

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кораблебудівний навчально-науковий інститут

Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

Коростильов Л.І.



(підпис)

«24» грудня 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему:

«Розробка технологічного процесу виготовлення секції верхньої палуби проекту лісовозу»

Виконав: студент(ка) 6118 мх групи


_____ Луб'яна Е.І.
(підпис)

Керівник роботи: доцент кафедри, к.т.н.


_____ Соков В.М.
(підпис)

Миколаїв 2024

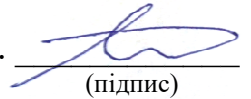
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально науковий інститут(факультет): Кораблебудівний

Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля
Спеціальність 135 Суднобудування
Освітня програма «Суднокорпусобудування»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Гарант освітньої програми

Литвиненко Д.Ю.



(підпис)

«02» грудня 2024 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти магістра**

Студентці Луб'яній Елізі Ігорівні

1. Тема роботи: Розробка технологічного процесу виготовлення секції верхньої палуби проекту лісовозу.

Керівник роботи: Соков В.М., к.т.н., доц. кафедри.

Затверджені наказом ректора № 1185-уч від «12» листопада 2024 року.

2. Термін подання роботи до 16 грудня 2024 року.

3. Вихідні дані по роботі: прототип судна, фахова література, матеріали конференцій, репозитарій університету.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів):

Розділ 1. Теоретичні основи проектування та виробництва лісовозів.









Розділ 2. Визначення головних розмірів проекту комбінованого судна суховантажу-лісовоза.

Розділ 3. Розрахунок елементів корпусу судна за правилами класифікаційного товариства України.

Розділ 4. Дослідження міцності і стійкості перекриття верхньої палуби з врахуванням технологічних факторів.

5. Перелік презентаційних матеріалів виконаний в середовищі PowerPoint.

6. Консультанти розділів роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Соков В.М.		
2	Соков В.М.		
3	Соков В.М.		
4	Соков В.М.		

7. Дата видачі завдання: 16 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Теоретичні основи проектування та виробництва лісовозів	вересень 2024	виконано
2	Визначення головних розмірів проекту комбінованого судна суховантажу-лісовоза	вересень 2024	виконано
3	Розрахунок елементів корпусу судна за правилами класифікаційного товариства України	жовтень 2024	виконано
4	Дослідження міцності і стійкості перекриття верхньої палуби з врахуванням технологічних факторів	жовтень-грудень 2024	виконано
5	Оформлення магістерської роботи	грудень 2024	виконано
6	Передача магістерської роботи на рецензування рецензенту	грудень 2024	виконано
7	Передача магістерської роботи науковому керівнику для написання відгуку	грудень 2024	виконано
8	Кафедральний захист магістерської роботи	05 грудня 2024	виконано
9	Захист магістерської роботи	24 грудня 2024	виконано

Студент


(підпис)

Луб'яна Е.І.
(ПІБ)

Керівник роботи


(підпис)

Соков В.М.
(ПІБ)

АНОТАЦІЯ

Луб'яна Е.І. Розробка технологічного процесу виготовлення секції верхньої палуби проекту лісовозу. Кваліфікаційна магістерська робота зі спеціальності 135 «Суднобудування», освітньої програми «Суднокорпусобудування». Миколаїв: НУК ім. адмірала Макарова, 2024. 113 с.

В рамках даної магістерської кваліфікаційної роботи був розроблений спрощений проект комбінованого судна суховантажу-лісовозу. Робота складається з чотирьох розділів, які відображають основні етапи проектування судна та науково-дослідну частину. В першому розділі описана теоретична, яка стосується огляду інформації щодо лісовозів. У другому розділі відбувається визначення головних розмірів судна-проекту із судна-прототипу методом послідовних наближень шляхом вирішення рівняння мас. У третьому розділі відбувається розрахунок елементів корпусу судна за Правилами класифікаційного товариства України. В четвертому розділі в рамках наукового дослідження опрацьовані різні конструктивні рішення для верхньої палуби (ВП) з метою визначення динаміки зміни маси перекриття в залежності від кількості поздовжніх та поперечних балок підкріплення настилу, для можливості правильного прийняття конструктивного рішення. Окремо проаналізовані варіанти профілів поздовжніх балок та створені відповідні моделі вартісно-економічного аналізу з врахуванням технологічних факторів для можливості прийняття рішення щодо застосування певного виду профілю в рамках конкретного виробництва. Розроблена принципіальна технологія виготовлення перекриття ВП.

Ключові слова: лісовоз, верхня палуба, міцність, стійкість, технологія.

SUMMARY

Lubiana Eliza. Development of the technology process of manufacturing of the top deck's section of the timber truck's project. Qualification master's work on specialty 135

“Shipbuilding”, of the educational program “Ship Hull Building”. Mykolaiv: NUOS, 2024. 113 p.

As part of this master's thesis, a simplified design of a combined dry cargo and timber carrier vessel was developed. The work consists of four chapters, which reflect the main stages of ship design and the research part. The first section describes the theoretical part, which deals with the review of information on timber carriers. The second section describes the determination of the main dimensions of the project vessel from the prototype vessel by the method of successive approximations by solving the equation of masses. In the third section, the calculation of the ship's hull elements is performed according to the Rules of the Classification Society of Ukraine. In the fourth section, various design solutions for the upper deck (UD) are developed within the framework of the research in order to determine the dynamics of changes in the mass of the floor depending on the number of longitudinal and transverse beams supporting the floor, in order to make the right design decision. The variants of longitudinal beam profiles were analyzed separately and the corresponding models of cost-economic analysis were created taking into account technological factors to make a decision on the use of a certain type of profile within a particular production. A fundamental technology for the manufacture of the floor of the substation has been developed UD.

Keywords: timber truck, top deck, strength, stability, technology.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИРОБНИЦТВА ЛІСОВОЗІВ	11
1.1 Значення лісової промисловості та роль лісовозів у морських перевезеннях.....	11
1.2 Класифікація та основні тип лісовозів	12
1.3. Конструктивні особливості лісовозів.....	15
1.4. Вимоги до проектування верхньої палуби лісовозів	18
1.5 Висновки до розділу.....	20
2 ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ ПРОЕКТУ КОМБІНОВАНОГО СУДНА СУХОВАНТАЖУ-ЛІСОВОЗА.....	22
2.1 Визначення масових характеристик судна-проекту у першому наближенні	22
2.2 Визначення лінійних характеристик судна-проекту в першому наближенні	27
2.3 Визначення масових та лінійних характеристик судна-проекту у другому наближенні	31
3 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ КОРПУСУ СУДНА ЗА ПРАВИЛАМИ КЛАСИФІКАЦІЙНОГО ТОВАРИСТВА УКРАЇНИ	36
3.1. Опис архітектурно-конструктивного типу судна	36
3.2 Розрахункові навантаження	38
3.3 Загальна поздовжня міцність судна	44
3.4 Визначення товщин листів	45
3.5 Проектування ребер жорсткості набору	52
3.6 Перевірка загальної поздовжньої міцності	58
4 ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ І СТІЙКОСТІ ПЕРЕКРИТТЯ ВЕРХНЬОЇ ПАЛУБИ З ВРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ	62

4.1 Загальні положення.....	62
4.2 Параметри серійних розрахунків.....	79
4.3 Аналіз профілів поздовжніх балок ВП з фіксованим числом поздовжніх балок і бімсів.....	81
4.4 Аналіз параметрів перекриття при зміні кількості бімсів для фіксованої кількості поздовжніх РЖ.....	87
4.5 Аналіз параметрів перекриття при зміні кількості поздовжніх РЖ для фіксованої кількості бімсів.....	92
4.6 Аналіз отриманих результатів.....	102
4.7 Розробка технології виготовлення секції перекриття ВП.....	105
ВИСНОВКИ.....	112
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	113

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВП – верхня палуба

РЖ – ребро жорсткості

ВСТУП

Лісовози є важливим транспортним засобом в економіці країни, які дозволяють найбільш дешево перевозити великі об'єми деревини на великі відстані водним шляхом. Проте в умовах України чисто лісовози не будуть конкурентно спроможними на ринку перевезень, і більшість часу своєї експлуатації будуть знаходитися в простой. Тому доцільним є розробка комбінованого судна суховантажу-лісовозу, який поєднує в собі якості суховантажу та лісовозу і може перевозити сухий вантаж і ліс на верхній палубі, коли потрібно. В цьому разі таке судно вже не буде спеціалізованим лісовозом, і не буде мати відповідної марки. В такому випадку для подібних суден дозволяється укладка лісу висотою не більше 1/3 найбільшої ширини судна. Вказана умова експлуатації з лісом на ВП потребує окремого розрахунку ВП з умов міцності і стійкості. Розроблюване судно проектується за методиками суховантажу, а тому загальні методики Регістру в цьому випадку можуть не забезпечити необхідні параметри експлуатаційної надійності ВП при перевозці лісу на ВП.

Спроектоване перекриття ВП повинно по-перше задовольняти вимогам міцності і стійкості, по-друге бути якомога легшими, і по-третє бути якомога дешевшими у виробництві. Щоб забезпечити виконання вищезазначених умов в рамках наукової частини роботи досліджується вплив варіювання чисельності поздовжніх і поперечних балок (тобто бімсів) на масу перекриття ВП, при забезпеченні необхідної міцності і стійкості як перекриття в цілому, так і окремих його елементів, з врахуванням технологічних факторів. Окремо проаналізовано можливість застосування різних типів профілів поздовжніх РЖ: катаних, зварних, полоси з метою вибору найдешевшого варіанту собівартості виготовлення, також з врахуванням технологічних факторів. Була розроблена принципіальна технологія виробництва з підрахунком вартості і часу виготовлення секції в цілому та його елементів.

Метою магістерської роботи є дослідження впливу варіювання числа балок перекриття/секції ВП на його масу та собівартість виготовлення, з врахуванням

технологічних факторів, для того щоб розробити масштабовану модель вартісно-економічного аналізу для прийняття рішення в рамках конкретного виробництва.

Щоб виконати поставлену мету необхідно вирішити наступні задачі.

1) Знайти розміри судна в двох наближеннях шляхом розв'язання рівняння мас у різних формах.

2) Розрахувати елементи корпусу судна за Правилами Регістру України.

3) Провести серійні розрахунки при варіюванні числа поздовжніх і поперечних балок з метою виявлення тенденції зміни маси перекриття від числа вказаних балок. В рамках цієї задачі необхідно для кожного з фіксованих чисел балок в рамках серійних розрахунків розглянути можливість застосування таких профілів як катаних, зварних, полоси з метою вибору найдешевшого варіанту собівартості виготовлення, враховуючи реальні виробничі процеси. Розробити масштабовану вартісно-економічну модель оцінки вартості і часу виготовлення перекриття секції ВП в залежності від параметрів. Представити принципову технологію виготовлення секції ВП.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИРОБНИЦТВА ЛІСОВОЗІВ

1.1 Значення лісової промисловості та роль лісовозів у морських перевезеннях

Лісова промисловість є однією з ключових галузей світової економіки, яка забезпечує людство цінними природними ресурсами та сприяє сталому розвитку. Деревина, як один з найбільш універсальних та екологічних матеріалів, широко використовується в будівництві, меблевій промисловості, виробництві паперу та упаковки, а також у багатьох інших сферах. Для задоволення зростаючого попиту на деревину та продукти її переробки необхідна ефективна та надійна система транспортування лісових вантажів. Враховуючи глобальний характер лісової промисловості та значні відстані між регіонами заготівлі та ринками збуту, морські перевезення відіграють ключову роль у забезпеченні стабільних та економічно вигідних поставок лісових вантажів. Завдяки своїм унікальним конструктивним особливостям та обладнанню, вони забезпечують ефективне та безпечне транспортування лісових вантажів на великі відстані, зв'язуючи віддалені лісозаготівельні регіони з промисловими центрами та ринками споживання.

За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (ФАО), щорічний обсяг світової торгівлі лісовою продукцією становить близько 250 мільярдів доларів США, при цьому частка морських перевезень у міжнародній торгівлі деревиною перевищує 90%. Ефективність та надійність роботи лісовозів безпосередньо впливають на стабільність поставок сировини для деревообробної та целюлозно-паперової промисловості, а також на кінцеву вартість продукції для споживачів. Будь-які збої або затримки в роботі лісовозів можуть призвести до дефіциту сировини, простоїв виробництва та зростання цін на кінцеву продукцію.

Крім економічної ролі, лісовози також мають важливе значення для сталого розвитку та охорони навколишнього середовища. Морські перевезення вважаються одним з найбільш екологічних видів транспорту завдяки оптимізації логістичних процесів та зниженню питомих викидів парникових газів на тонну перевезеного

вантажів. Сучасні лісовози обладнані ефективними двигунами та системами очищення відпрацьованих газів, що дозволяє мінімізувати їх вплив на довкілля. Враховуючи зростаючий попит на деревину та посилення вимог до екологічності й ефективності перевезень, розробка нових проектів лісовозів та вдосконалення існуючих конструкцій є актуальним завданням суднобудівної галузі.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що лісова промисловість відіграє ключову роль у світовій економіці, забезпечуючи людство цінними природними ресурсами та підтримуючи сталий розвиток. Морські перевезення є найбільш ефективним та екологічним способом транспортування лісових вантажів на великі відстані, а лісовози, як спеціалізовані судна для перевезення деревини та продуктів її переробки, є невід'ємною частиною глобальної транспортної системи. Розробка нових проектів лісовозів та вдосконалення існуючих конструкцій дозволяє підвищити ефективність, безпеку та екологічність морських перевезень лісових вантажів. Подальший розвиток та модернізація флоту лісовозів є необхідною умовою для сталого розвитку лісової промисловості та світової економіки в цілому.

1.2 Класифікація та основні типи лісовозів

Лісовози - це спеціалізовані судна, призначені для перевезення різноманітних лісових вантажів. Вони відіграють важливу роль у транспортуванні деревини та продуктів її переробки від місць заготівлі до пунктів споживання. Для ефективного виконання цих завдань лісовози повинні мати певні конструктивні особливості та відповідати специфічним вимогам галузі. Класифікація лісовозів здійснюється за кількома ключовими критеріями, які враховують тип вантажу, спосіб завантаження/розвантаження, район плавання та вантажомісткість судна. Ця класифікація дозволяє систематизувати різноманітні типи лісовозів та визначити їх основні характеристики. За типом вантажу лісовози поділяються на чотири основні категорії: судна для перевезення круглого лісу, пиломатеріалів, деревної щепи та тріски, а також комбіновані лісовози.

Судна для перевезення круглого лісу призначені для транспортування необроблених колод різної довжини та діаметру. Вони мають спеціальні трюми з гладкою підлогою та високими бортами, що дозволяє ефективно розміщувати та закріплювати колоди. Такі судна зазвичай обладнані потужними кранами або стрілами для завантаження/розвантаження лісу. Лісовози для перевезення пиломатеріалів мають інші конструктивні особливості. Вони обладнані трюмами з додатковими палубами (твіндеками) для зручності розміщення пакетів дощок та брусів. Ці судна також мають спеціальні системи кріплення вантажу, що запобігають зміщенню пиломатеріалів під час качки та маневрів судна. Судна для перевезення деревної щепи та тріски мають унікальну конструкцію трюмів, пристосовану для транспортування насипних вантажів. Ці трюми мають великий об'єм та спеціальну форму для оптимального розміщення та вивантаження щепи та тріски. Такі судна зазвичай обладнані конвеєрними системами для завантаження/розвантаження вантажу.

Комбіновані лісовози - це універсальні судна, здатні перевозити різні типи лісових вантажів. Вони мають трансформовані трюми та змінне обладнання, що дозволяє адаптувати судно під конкретний вид вантажу. Це забезпечує високу гнучкість та ефективність використання комбінованих лісовозів. За способом завантаження/розвантаження лісовози поділяються на три основні типи: з вертикальним завантаженням, горизонтальним завантаженням (ро-ро) та комбінованим завантаженням. Кожен з цих типів має свої переваги та обмеження, що впливають на швидкість та зручність вантажних операцій. Лісовози з вертикальним завантаженням оснащені потужними кранами або стрілами, які дозволяють завантажувати колоди та пакети пиломатеріалів зверху.

Лісовози типу "ро-ро" (roll-on/roll-off) мають спеціальні відкидні апарелі або рампи, що дозволяють завантажувати ліс за допомогою автомобільної техніки. Цей спосіб завантаження є швидким та зручним, особливо для коротких маршрутів та частих заходів у порти. Однак він вимагає наявності спеціальних причальних споруд та достатньої кількості техніки для завантаження/розвантаження. Комбіновані лісовози можуть використовувати обидва способи завантаження залежно від типу

вантажу та наявного портового обладнання. За районом плавання лісовози поділяються на три основні категорії: морські, прибережні (каботажні) та річкові. Кожна з цих категорій має свої особливості конструкції та експлуатації, що відповідають умовам плавання та характеристикам водних шляхів.

Морські лісовози призначені для перевезень між портами різних країн та континентів. Вони мають великі розміри, високу автономність плавання та здатність витримувати складні погодні умови у відкритому морі. Ці судна повинні відповідати міжнародним стандартам безпеки мореплавства та мати необхідне обладнання для тривалих рейсів. Прибережні (каботажні) лісовози здійснюють перевезення вздовж узбережжя в межах однієї країни. Вони мають менші розміри та осадку порівняно з морськими лісовозами, що дозволяє їм заходити в мілководні порти та navigational waters. Ці судна повинні відповідати національним вимогам безпеки та мати обладнання для роботи в прибережних водах.

Річкові лісовози призначені для перевезення деревини по внутрішніх водних шляхах, таких як річки, канали та озера. Вони мають спеціальну конструкцію корпусу та обладнання, що враховує особливості плавання в обмежених фарватерах та під мостами. Ці судна повинні мати малу осадку, високу маневреність та здатність працювати в умовах змінних рівнів води.

Вантажомісткість або тоннаж лісовозів варіюється в широких межах залежно від розмірів судна та його призначення. Найменші лісовози можуть мати вантажомісткість у кілька тисяч тонн, тоді як найбільші морські лісовози здатні перевозити до 50 000 тонн вантажу за один рейс. Вибір оптимального тоннажу лісовоза залежить від специфіки маршруту, характеристик портів та економічної ефективності перевезень. Незалежно від типу та розмірів, всі лісовози повинні відповідати міжнародним стандартам безпеки мореплавства, встановленим Міжнародною морською організацією (ІМО). Це включає вимоги до міцності корпусу, остійності, непотоплюваності, протипожежного захисту та рятувального обладнання. Лісовози також повинні мати необхідне обладнання для надійної фіксації вантажу, такі як ланцюги, стропи та спеціальні кріплення, що запобігають зміщенню лісу під час качки та маневрів судна [2].

Крім того, сучасні лісовози повинні відповідати екологічним вимогам та стандартам щодо запобігання забрудненню навколишнього середовища. Це передбачає наявність систем очищення баластних вод, утилізації відходів та зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу.

На рис. 1.1 представлено приклад сучасного морського лісовоза типу "ро-ро" з горизонтальним завантаженням.

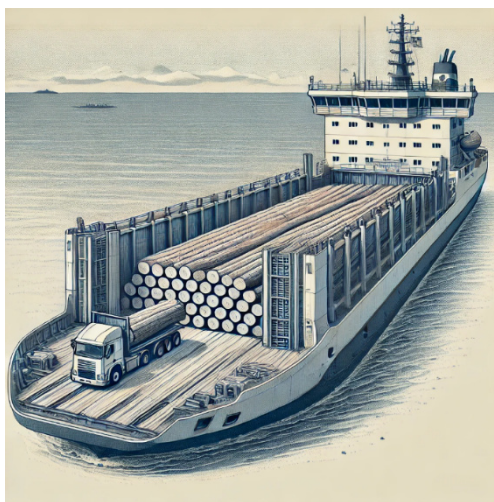


Рис. 1.1 - Морський лісовоз типу "ро-ро"

Таким чином, класифікація та основні типи лісовозів відображають різноманітність конструктивних рішень та експлуатаційних характеристик цих спеціалізованих суден.

1.3. Конструктивні особливості лісовозів

Лісовози мають ряд конструктивних особливостей, що відрізняють їх від інших типів вантажних суден. Ці особливості обумовлені специфікою лісових вантажів, умовами завантаження та розвантаження, а також вимогами до безпеки перевезень. Одним з ключових елементів конструкції лісовоза є корпус судна. Він повинен мати достатню міцність та стійкість для протидії значним навантаженням, які виникають під час розміщення та транспортування лісового вантажу.

Для ефективного розміщення та збереження лісового вантажу лісовози оснащені спеціально спроектованими вантажними трюмами. Форма та розміри цих

трюмів залежать від типу лісовоза та виду вантажу, який він перевозить. Наприклад, трюми для круглого лісу мають більшу висоту та відсутність твіндеків (додаткових палуб), що дозволяє оптимально розміщувати довгі колоди. В той же час, трюми для пиломатеріалів мають менші розміри та обладнані твіндеками для зручності розміщення пакетів дощок та брусів. Для забезпечення надійної герметизації трюмів та захисту вантажу від потрапляння води та інших зовнішніх впливів лісовози обладнані спеціальними люковими закриттями. Зазвичай на цих судах використовуються складні багатосекційні люкові закриття з гідравлічним приводом, що дозволяє швидко та надійно відкривати та закривати люки під час вантажних операцій.

Найважливішим аспектом конструкції лісовозів є наявність потужного та ефективного вантажного обладнання. Це можуть бути крани, стріли, лебідки та інші механізми, призначені для завантаження та розвантаження лісу. Тип та характеристики цього обладнання залежать від способу перевантаження вантажу (вертикальний, горизонтальний або комбінований) та вимог до продуктивності вантажних операцій. Наприклад, лісовози з вертикальним завантаженням зазвичай мають високі та потужні крани, здатні піднімати важкі пакети колод та пиломатеріалів.

Для надійної фіксації лісового вантажу в трюмах та запобігання його зміщенню під час качки та маневрів судна лісовози оснащені спеціальними системами кріплення. Ці системи включають ланцюги, стропи, упори та інші пристрої, які дозволяють надійно закріпити ліс та забезпечити його стабільне положення протягом всього рейсу. Правильне розміщення та кріплення вантажу є критично важливим для безпеки судна та екіпажу, особливо в умовах складної погоди та хвилювання моря. Ще однією важливою системою лісовозів є баластна система. Вона призначена для регулювання осадки та диференту судна шляхом прийому або видалення водного баласту. Це дозволяє оптимально розподілити вагу вантажу та забезпечити необхідну остійність судна в різних умовах завантаження. Ефективна робота баластної системи є запорукою безпечної та ефективної експлуатації лісовоза. Тут знаходяться каюти екіпажу, рульова та штурманська

рубки, а також інші службові приміщення. Конструкція надбудови повинна забезпечувати комфортні та безпечні умови роботи та відпочинку екіпажу, а також ефективне управління судном та його системами [3].

На рис. 1.2 представлено схему основних конструктивних елементів типового лісовоза.

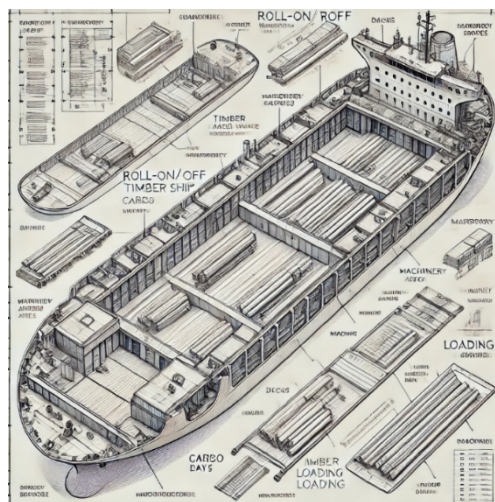


Рис. 1.2 - Схема конструкції лісовоза

При проектуванні лісовозів необхідно враховувати не лише функціональність та ефективність конструкції, але й вимоги міжнародних конвенцій та класифікаційних товариств щодо забезпечення безпеки судна та екіпажу. Зокрема, лісовози повинні відповідати вимогам Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі (SOLAS), яка встановлює стандарти щодо конструкції, обладнання та експлуатації суден. Крім того, лісовози повинні відповідати вимогам класифікаційних товариств, таких як Lloyd's Register, Bureau Veritas, Det Norske Veritas та інших. Ці організації здійснюють нагляд за проектуванням, будівництвом та експлуатацією суден, забезпечуючи їх відповідність встановленим стандартам безпеки та якості.

Зокрема, класифікаційні товариства встановлюють вимоги до міцності корпусу лісовоза, яка повинна бути достатньою для протидії навантаженням від вантажу та зовнішніх сил. Також перевіряється остійність судна, тобто його здатність протистояти перекиданню під дією вітру та хвиль. Лісовози повинні мати достатню початкову остійність та запас плавучості, щоб забезпечити безпеку судна

та екіпажу в різних умовах експлуатації. Ще одним важливим аспектом безпеки лісовозів є їх непотоплюваність. Судно повинно бути спроектоване таким чином, щоб у разі пошкодження корпусу та затоплення одного або декількох відсіків воно залишалося на плаву та зберігало остійність. Для цього лісовози обладнані водонепроникними перебірками, які розділяють корпус на відсіки та обмежують поширення води у разі пошкодження [4].

Таким чином, конструктивні особливості лісовозів обумовлені специфікою вантажів, які вони перевозять, а також високими вимогами до безпеки та ефективності експлуатації цих суден.

1.4. Вимоги до проектування верхньої палуби лісовозів

Верхня палуба є важливим конструктивним елементом лісовоза, який виконує ряд ключових функцій. По-перше, вона забезпечує додатковий простір для розміщення лісового вантажу або спеціального обладнання. По-друге, верхня палуба слугує опорою для кранів, стріл та інших вантажних механізмів, які використовуються для завантаження та розвантаження судна. По-третє, вона забезпечує захист трюмів та вантажу від зовнішніх впливів, таких як вітер, хвилі та опади. Враховуючи важливість верхньої палуби для ефективною та безпечною експлуатації лісовоза, до її проектування висуваються підвищені вимоги. Перш за все, конструкція верхньої палуби повинна мати достатню міцність та жорсткість для протидії значним навантаженням, які виникають під час розміщення та транспортування лісового вантажу, а також під дією зовнішніх сил, таких як вітер та хвилі. Для забезпечення необхідної міцності та жорсткості використовуються високоміцні сталі, посилені балки та зв'язки, а також спеціальні конструктивні рішення, такі як додаткові опори та ребра жорсткості.

Іншою важливою вимогою до верхньої палуби лісовоза є її вантажопідйомність. Палуба повинна мати достатню площу та допустиме навантаження для розміщення необхідної кількості лісового вантажу або спеціального обладнання. При цьому необхідно враховувати не лише статичні

навантаження від ваги вантажу, але й динамічні навантаження, які виникають під час качки та маневрів судна. Для забезпечення оптимального розподілу навантажень та запобігання перевантаженню окремих ділянок палуби використовуються спеціальні розрахунки та комп'ютерне моделювання. Враховуючи агресивний вплив морського середовища, особлива увага при проектуванні верхньої палуби лісовоза приділяється її стійкості до корозії. Конструкції верхньої палуби постійно піддаються впливу солоної води, вологи, опадів та інших корозійних факторів, що може призвести до передчасного зносу та руйнування металу. Для захисту від корозії використовуються спеціальні покриття, такі як фарби, ґрунтовки та інгібітори корозії, а також катодний захист, який забезпечує електрохімічний захист металевих конструкцій.

Ще однією важливою вимогою до проектування верхньої палуби лісовоза є забезпечення зручності її експлуатації та обслуговування. При цьому необхідно враховувати ергономічні фактори, такі як висота розташування обладнання, зручність доступу, освітлення робочих зон тощо. Для запобігання накопиченню води на верхній палубі та зниження остійності судна лісовози обладнуються ефективною дренажною системою. Ця система включає спеціальні шпігати (отвори) та трубопроводи, які забезпечують швидке відведення води за борт. Розташування та розміри дренажних отворів повинні забезпечувати ефективне видалення води з усіх ділянок палуби, включаючи важкодоступні місця. Враховуючи підвищену пожежну небезпеку лісових вантажів, на верхній палубі повинні бути передбачені ефективні засоби виявлення та гасіння пожежі, такі як системи пожежної сигналізації, автоматичні системи пожежогасіння, а також ручні засоби гасіння. Розташування протипожежного обладнання повинно забезпечувати швидкий доступ та ефективне гасіння пожежі в будь-якій точці палуби.

На рис. 1.3 представлено приклад компонування верхньої палуби лісовоза з розміщенням основних елементів та обладнання.

та баластна система, показав, що ці судна мають унікальні конструктивні рішення, які забезпечують ефективно та безпечно транспортування лісових вантажів. Було розглянуто вимоги до міцності та жорсткості конструкції, вантажопідйомності, стійкості до корозії, зручності експлуатації, дренажної системи та протипожежного захисту.

Проведений аналіз підтвердив актуальність та практичну значимість розробки нових проектів лісовозів з удосконаленням конструкції та технології виробництва окремих секцій, зокрема верхньої палуби. Інноваційні рішення та передові технології, такі як оптимізація форми корпусу, використання легких та міцних матеріалів, автоматизація вантажних операцій та впровадження альтернативних джерел енергії, відкривають нові можливості для підвищення ефективності, безпеки та екологічності лісовозів. Подальший розвиток та модернізація флоту лісовозів є необхідною умовою для сталого розвитку лісової промисловості та світової економіки в цілому.

Таким чином, проведений у першому розділі магістерської роботи аналіз теоретичних основ проектування та виробництва лісовозів закладає міцний фундамент для подальшого дослідження та розробки проекту лісовоза з удосконаленням технологічного процесу виготовлення секції верхньої палуби судна.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ ПРОЕКТУ КОМБІНОВАНОГО СУДНА СУХОВАНТАЖУ-ЛІСОВОЗА

В рамках цього розділу відбувається розробка спрощеного проекту комбінованого судна суховантажу-лісовозу. Сухим вантажем є пшениця, а типом лісу – тверді породи дерева, такі як дуб, бук, ясьень тощо. Питома кубатура для вказаних вантажів є однаковою. Поєднання суховантажу-лісовозу підвищує універсальність судна при експлуатації і підвищує його конкурентну спроможність на ринку перевозок. Проте таке поєднання можливостей судна призводить до того, що конструктивні особливості розроблюваного судна не є чисто як для лісовоза, а тому розроблюване судно не має відповідної вантажної марки, яку мають спеціалізовані лісовози. Таке дещо обмеження накладає деякі умови на транспортування лісу. В цьому випадку висота укладки лісу дозволяється не більше третини найбільшої ширини, що буде враховано в подальших дослідженнях.

Визначення головних розмірів судна, яке проектується відбувається шляхом послідовних наближень. Так як невідома потужність головного двигуна судна-проекту, не можна з достатньою точністю визначити масу розділу «Енергетична установка». Невідомою є характеристика «питома витрата палива», а тому маса розділу «Паливо» визначається приблизно. Це викликає необхідність визначати головні розміри судна-проекту послідовними наближеннями.

2.1 Визначення масових характеристик судна-проекту у першому наближенні

На початковому етапі для судна-проекту складається рівняння мас, яке залежить від водотоннажності. Параметри мас у цьому випадку визначаються на основі судна-прототипу. Розв'язуючи дане рівняння, визначаємо водотоннажність проектного судна в першому наближенні. Далі, для перевірки, розраховуються значення складових масового навантаження, сума яких повинна відповідати отриманій водотоннажності проектного судна в першому наближенні з точністю до 1%.

В табл. 2.1 наведено характеристики судна-прототипу, які використовуються для розробки проектного судна.

Таблиця 2.1 – Дані судна-прототипу

№ п/п	Назва величини	Позначення	Значення
1	Довжина найбільша, м	\bar{L}_{\max}	114,63
2	Довжина між перпендикулярами, м	$\bar{L}_{\perp\perp} = \bar{L}$	102,45
3	Ширина судна, м	\bar{B}	15
4	Висота борта, м	\bar{H}	8,3
5	Осадка судна, м	\bar{T}	6,19
6	Коефіцієнт загальної повноти	$\bar{\delta}$	0,851
7	Коефіцієнт повноти ватерлінії	$\bar{\alpha}$	0,888
8	Коефіцієнт повноти за шпангоутом	$\bar{\beta}$	0,97
9	Експлуатаційна швидкість, вузли	\bar{v}_e	13,3
10	Швидкість на випробуваннях, вузли	$\bar{v}_в$	13,5
11	Потужність СЕУ експлуатаційна, кВт	\bar{N}_e	2220
12	Потужність СЕУ на випробуваннях, кВт	$\bar{N}_в$	2640
13	Дальність плавання, миль	\bar{Z}	6000
14	Коефіцієнт утилізації	$\bar{\eta}$	0,483
15	Кількість гвинтів	–	1
16	Кількість екіпажу, чоловік	–	14
17	Металевий корпус (мк)		
	Маса, т	$\bar{P}_{\text{мк}}$	1554
	Абсциса ЦТ, м	$\bar{x}_{\text{мк}}$	5,12
	Апліката ЦТ, м	$\bar{z}_{\text{мк}}$	4,98
18	Обладнання (об)		
	Маса, т	$\bar{P}_{\text{об}}$	444
	Абсциса ЦТ, м	$\bar{x}_{\text{об}}$	9,32
	Апліката ЦТ, м	$\bar{z}_{\text{об}}$	8,47
19	Енергетична установка (еу)		
	Маса, т	$\bar{P}_{\text{еу}}$	358
	Абсциса ЦТ, м	$\bar{x}_{\text{еу}}$	-34,83
	Апліката ЦТ, м	$\bar{z}_{\text{еу}}$	4,57
20	Паливо (пал)		
	Маса, т	$\bar{P}_{\text{пал}}$	317
	Абсциса ЦТ, м	$\bar{x}_{\text{пал}}$	-7,48
	Апліката ЦТ, м	$\bar{z}_{\text{пал}}$	4,98
21	Запас водотоннажності (зв)		
	Маса, т	$\bar{P}_{\text{зв}}$	350

№ п/п	Назва величини	Позначення	Значення
	Абсциса ЦТ, м	$\bar{x}_{зв}$	-0.1
	Апліката ЦТ, м	$\bar{z}_{зв}$	0
	Постачання (пос)		
22	Маса, т	$\bar{P}_{пос}$	105
	Абсциса ЦТ, м	$\bar{x}_{пос}$	-39,96
	Апліката ЦТ, м	$\bar{z}_{пос}$	6,47
	Баласт (б)		
23	Маса, т	$\bar{P}_б$	680
	Абсциса ЦТ, м	$\bar{x}_б$	9,22
	Апліката ЦТ, м	$\bar{z}_б$	1,41
	Вантаж (в)		
24	Маса, т	$\bar{P}_в$	4350
	Абсциса ЦТ, м	$\bar{x}_в$	3,07
	Апліката ЦТ, м	$\bar{z}_в$	8,3
25	Водотоннажність, т	\bar{D}	8158
26	Довжина машинного відділення, м	$\bar{L}_{мв}$	20,6
27	Довжина форпіка, м	$\bar{L}_{фор}$	10
28	Довжина ахтерпіка, м	$\bar{L}_{ахт}$	8,66
29	Поздовжній метацентричний радіус, м	\bar{R}	139,24
30	Відношення \bar{B} / \bar{T}	–	2,423
31	Відношення \bar{L} / \bar{B}	–	6,830
32	Відношення \bar{H} / \bar{T}	–	1,341

Вихідні дані для судна-проекту наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Дані по судну-проекту

№ п/п	Назва величини	Позначення	Значення
1	Вантажомісткість, т	P_v	6750
2	Експлуатаційна швидкість, вузли	v_e	12,0
3	Швидкість на випробуваннях, вузли	v_v	12,2
4	Дальність плавання, миль	Z	6500
5	Район плавання	–	необмежений
6	Льодова категорія	–	–
7	Тип ЕУ	–	ДВЗ
8	Питома навантажувальна кубатура для зерна пшениці, м ³ /т	μ	1,25

В табл. 2.3 наведено розрахунок допоміжних даних.

Таблиця 2.3 – Розрахунок даних для рівняння мас судна-проекту

№ п/п	Назва величини	Позначення	Формула	Значення
1	Вимірник маси металевого корпусу	$a_{\text{МК}}$	$a_{\text{МК}} = \frac{\overline{P}_{\text{МК}}}{D}$	0,1905
2	Вимірник маси обладнання	$a_{\text{об}}$	$a_{\text{об}} = \frac{\overline{P}_{\text{об}}}{D^3}$	1,0956
3	Вимірник маси енергетичної установки, т/кВт	$a_{\text{еу}}$	$a_{\text{еу}} = \frac{\overline{P}_{\text{еу}}}{N_{\text{в}}}$	0,1356
4	Вимірник маси палива, т/(кВт·год)	$a_{\text{пал}}$	$a_{\text{пал}} = \frac{\overline{P}_{\text{пал}} \cdot \overline{v}_{\text{е}}}{N_{\text{е}} \cdot Z}$	3,1652E-04
5	Вимірник маси запасу водотоннажності	$a_{\text{зв}}$	$a_{\text{зв}} = \frac{\overline{P}_{\text{зв}}}{D} \geq 0,01$	4,2903E-02
6	Вимірник маси запасу постачання	$a_{\text{пос}}$	$a_{\text{пос}} = \frac{\overline{P}_{\text{пос}}}{D}$	1,2871E-02
7	Адміралтейський коефіцієнт при експлуатації	$C_{\text{е}}$	$C_{\text{е}} = \frac{\overline{D}^{\frac{2}{3}} \cdot \overline{v}_{\text{е}}^{-3}}{N_{\text{е}}}$	429,5
8	Адміралтейський коефіцієнт на випробуваннях	$C_{\text{в}}$	$C_{\text{в}} = \frac{\overline{D}^{\frac{2}{3}} \cdot \overline{v}_{\text{в}}^{-3}}{N_{\text{в}}}$	377,7
9	Коефіцієнт утилізації водотоннажності по чистій вантажопідйомності:	$\overline{\eta}_0$	$\overline{\eta}_0 = \frac{\overline{P}_{\text{в}}}{D}$	0,5332
10	Уточнене значення $\overline{\eta}_0$ в зв'язку з різницею проекту та прототипу за $\overline{v}_{\text{е}}$, $\overline{v}_{\text{в}}$ та Z	$\eta_0^{\text{ут}}$	$\eta_0^{\text{ут}} = \overline{\eta}_0 - \left(a_{\text{еу}} \left(\frac{\overline{v}_{\text{в}}}{\overline{v}_{\text{е}}} \right)^3 + a_{\text{пал}} \cdot \left(\frac{\overline{v}_{\text{е}}}{\overline{v}_{\text{е}}} \right)^2 \cdot \frac{Z}{Z} \right) + a_{\text{еу}} + a_{\text{пал}}$	0,5688
11	Ще раз уточнене $\eta_0^{\text{ут}}$ у зв'язку з існуванням масштабного ефекту	η_0	$\eta_0 = \eta_0^{\text{ут}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\overline{P}_{\text{в}}}{P_{\text{в}}}}$	0,6348
12	Очікувана водотоннажність	$D_{\text{оч}}$	$D_{\text{оч}} = \frac{P_{\text{в}}}{\eta_0}$	10633,0
13	Коефіцієнт в рівнянні мас	n	$n = 1 - a_{\text{МК}} - a_{\text{зв}} - a_{\text{пос}}$	0,7537
14	Коефіцієнт в рівнянні мас	m	$m = a_{\text{об}} + a_{\text{еу}} \cdot \frac{\overline{v}_{\text{в}}^3}{C_{\text{в}}} + a_{\text{пал}} \cdot \frac{\overline{v}_{\text{е}}^2}{C_{\text{е}}} \cdot Z$	2,4375

Масова водотоннажність D , т, судна-проекту визначається залежністю

$$D = P_{\text{МК}} + P_{\text{об}} + P_{\text{еу}} + P_{\text{пал}} + P_{\text{зв}} + P_{\text{пос}} + P_{\text{в}} + P_{\text{в}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{МК}}, P_{\text{об}}, P_{\text{су}}, P_{\text{пал}}, P_{\text{зв}}, P_{\text{пос}}, P_{\text{б}}, P_{\text{в}}$ – маси розділів відповідно: металевому корпусу, обладнання, енергетичної установки, палива, запасу водотоннажності, постачання, баласту, вантажу.

Всі складові (1) залежать від водотоннажності D , окрім $P_{\text{б}}, P_{\text{в}}$. Складові P_i в (1), залежні від водотоннажності D представляються у вигляді

$$P_i = a_i \cdot D, \quad (2)$$

де P_i – маса i -го розділу навантаження; a_i – частковий коефіцієнт маси відповідного розділу навантаження.

Для судна-проекту при 100% вантажу і 100% запасів масу баласту $P_{\text{б}}$ приймаємо $P_{\text{б}} = 0$.

У першому наближенні усі розділи навантаження проекту виражені в функції водотоннажності D , після чого вираз (1) приймає вигляд:

$$D = a_{\text{МК}} \cdot D + a_{\text{об}} \cdot D^{\frac{2}{3}} + a_{\text{су}} \cdot \frac{D^{\frac{2}{3}} \cdot v_{\text{в}}^3}{C_{\text{в}}} + a_{\text{пал}} \cdot \frac{D^{\frac{2}{3}} \cdot v_{\text{е}}^2}{C_{\text{е}}} \cdot Z + a_{\text{зв}} \cdot D + a_{\text{пос}} \cdot D + P_{\text{б}} + P_{\text{в}}. \quad (3)$$

де $a_{\text{МК}}, a_{\text{об}}, a_{\text{су}}, a_{\text{пал}}, a_{\text{зв}}, a_{\text{пос}}$ – вимірники мас відповідно: металевому корпусу, обладнання, енергетичної установки, палива, запасу водотоннажності, постачання, які були визначені в табл. 2.3.

Вираз (3) може бути переписаний наступним чином

$$\left. \begin{aligned} D(1 - a_{\text{МК}} - a_{\text{зв}} - a_{\text{пос}}) &= D^{\frac{2}{3}} \cdot \left(a_{\text{об}} + a_{\text{су}} \cdot \frac{v_{\text{в}}^3}{C_{\text{в}}} + a_{\text{пал}} \cdot \frac{v_{\text{е}}^2}{C_{\text{е}}} \cdot Z \right) + P_{\text{в}} + P_{\text{б}} \Rightarrow \\ n \cdot D &= m \cdot D^{\frac{2}{3}} + P_{\text{в}} \Rightarrow n \cdot D - m \cdot D^{\frac{2}{3}} - P_{\text{в}} - P_{\text{б}} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де коефіцієнти n, m були визначені в пунктах 13, 14 табл. 2.3.

Вирішуючи останнє нелінійне рівняння (4), використовуючи очікувану водотоннажність $D_{\text{оч}}$ (пункт 12 табл. 2.3) в якості початкового наближення, знайдемо водотоннажність судна-проекту у 1-му наближенні, яка становить

$$D_1 = D = 10506,7 \text{ т} \quad (5)$$

Різниця ε_1 між водотоннажністю у першому наближенні $D_1 = D$ (5) і очікуваною водотоннажністю $D_{\text{оч}}$, отриманою в пункті 12 табл. 2.3 становить

$$\varepsilon_1 = \left| \frac{D_1 - D_{\text{оч}}}{D_1} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{10506,7 - 10633}{10506,7} \right| \cdot 100\% = 1,2\%. \quad (6)$$

В першому наближенні приймаємо водотоннажність $D = D_1 = 10506,7$ т, визначену в (5), яка отримана шляхом вирішення нелінійного рівняння (4).

В табл. 2.4 представлено розподіл водотоннажності судна-проекту по розділам масового навантаження у першому наближенні, які отримані з рівняння (3).

Таблиця 2.4 – Розподіл по розділам масового навантаження судна-проекту у першому наближенні

№ п/п	Назва величини	Позначення	Формула	Значення
1	Маса металевого корпусу, т	$P_{\text{МК}}$	$P_{\text{МК}} = a_{\text{МК}} \cdot D$	2001,4
2	Маса обладнання, т	$P_{\text{об}}$	$P_{\text{об}} = a_{\text{об}} \cdot D^{\frac{2}{3}}$	525,6
3	Маса енергетичної установки, т	$P_{\text{еу}}$	$P_{\text{еу}} = a_{\text{еу}} \cdot \frac{D^{\frac{2}{3}} \cdot v_{\text{в}}^3}{C_{\text{в}}}$	312,8
4	Маса палива, т	$P_{\text{пал}}$	$P_{\text{пал}} = a_{\text{пал}} \cdot \frac{D^{\frac{2}{3}} \cdot v_{\text{е}}^2 \cdot Z}{C_{\text{е}}}$	330,9
5	Маса запасу водотоннажності, т	$P_{\text{зв}}$	$P_{\text{зв}} = a_{\text{зв}} \cdot D$	450,8
6	Маса постачання, т	$P_{\text{пос}}$	$P_{\text{пос}} = a_{\text{пос}} \cdot D$	135,2
7	Маса баласту, т	$P_{\text{б}}$	–	0,0
8	Маса вантажу, т	$P_{\text{в}}$	(п. 1, табл. 2.2)	6750,0
9	Сумарна маса, т	Σ_P	$\Sigma_P = P_{\text{МК}} + P_{\text{об}} + P_{\text{еу}} + P_{\text{пал}} + P_{\text{зв}} + P_{\text{пос}} + P_{\text{б}} + P_{\text{в}}$	10506,7

Як показує табл. 2.4 загальна маса $\Sigma_P = 10506,7$ т не відрізняється від водотоннажності $D = D_1 = 10506,7$ т на жоден відсоток, що підтверджує коректність проведених обчислень.

2.2 Визначення лінійних характеристик судна-проекту в першому наближенні

Розрахунок лінійних характеристик корпусу судна-проекту у першому наближенні і прототипу представлено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Розрахунок безрозмірних характеристик корпусу судна-проекту у першому наближенні

№ п/п	Назва величини	Позначення	Формула	Значення
1	Прискорення вільного падіння, м/с ²	g	–	9,81
2	Густина морської води, т/м ³	ρ_B	–	1,025
3	Відносна довжина проекту	l	$l = \left(2 + \frac{5}{\sqrt[3]{D}}\right) \cdot \sqrt[3]{v_e}$	5,102
4	Відносна довжина прототипу	\bar{l}	$\bar{l} = \frac{\bar{L}}{\sqrt[3]{\frac{D}{\rho_B}}}$	5,131
5	Прийнята відносна довжина	l	у судна з більшою швидкістю l є більшим; $\bar{v}_e = 13,3$ вуз $> v_e = 12,0$	5,102
6	Довжина проекту між $\perp\perp$, м	L	$L = l \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{\rho_B}}$	110,82
7	Число Фруда проекту	Fr	$Fr = \frac{0,514 \cdot v_e}{\sqrt{gL}}$	0,1871
8	Число Фруда прототипу	\bar{Fr}	$\bar{Fr} = \frac{0,514 \cdot \bar{v}_e}{\sqrt{g\bar{L}}}$	0,2156
9	Коефіцієнт загальної повноти	δ	$\delta = 1 - \frac{0,48}{1 + 100 \cdot \exp(-24 \cdot Fr)}$	0,774
10	Коефіцієнт поздовжньої остроти	φ	$\varphi = 1 - \frac{0,41}{1 + 100 \cdot \exp(-25 \cdot Fr)}$	0,788
11	Коефіцієнт повноти мідель-шпангоута	β	$\beta = \frac{\delta}{\varphi}$	0,982
12	Допоміжний коефіцієнт для визначення коефіцієнту повноти ВВЛ	a	$a = 1,01$ при $Fr < 0,25$	1,01
13	Коефіцієнт повноти ВВЛ	α	$\alpha = a \cdot \varphi^{2/3}$	0,861

В табл. 2.6 наведено вибір коефіцієнтів корпусу судна-проекту. Приймаючи значення коефіцієнтів δ , α , β в табл. 2.6, слід враховувати, що при більшому значенні числа Фруда (Fr) для проекту коефіцієнти повноти повинні бути меншими, ніж у судна-прототипу, і навпаки – якщо число Fr є меншим, то коефіцієнти приймаються більшими.

Таблиця 2.6 – Прийняті коефіцієнти корпусу судна-проекту

№ п/п	Величина	Проект	Прототип	Прийнято
1	Fr	0,1871	0,2156	0,1871
2	δ	0,774	0,851	0,851
3	β	0,982	0,970	0,982
4	α	0,861	0,888	0,888

Коефіцієнт зв'язку коефіцієнтів становить

$$KЗК = \frac{\alpha \cdot \beta}{\delta} = \frac{0,888 \cdot 0,983}{0,851} = 1,025, \quad (7)$$

який входить в допустимий діапазон $1,16 \pm 0,16$.

В табл. 2.7 наведено визначення головних розмірів судна-проекту. Для цих обчислень використовуються прийняті значення коефіцієнтів табл. 2.6.

Таблиця 2.7 – Визначення головних розмірів судна-проекту в 1-му наближенні

№ п/п	Назва величини	Позначення	Формула	Значення
1	Відношення ширини B до осадки T (приймаємо за прототипом)	C	$C = \frac{B}{T} = \frac{\bar{B}}{\bar{T}}$, п. 30 табл. 2.1	2,423
	Коефіцієнт виступаючих частин	$K_{вч}$	–	1,02
2	Відношення довжини L до ширини B проекту	A	$A = \frac{L}{B} = \sqrt{l^3 \cdot \delta \cdot \frac{1}{C} K_{вч} \cdot \rho_B}$	6,982
3	Відношення довжини L до ширини B прототипу	\bar{A}	$\bar{A} = \frac{\bar{L}}{\bar{B}}$, п. 31 табл. 2.1	6,830
4	Прийняте відношення $A = L/B$	A	у судна з більшою швидкістю L/B є більшим; $\bar{v}_e = 13,3$ вуз > $v_e = 12,0$ вуз	6,830
5	Довжина судна з умов плавучості, м	L	$L = \sqrt[3]{\frac{D \cdot A^2 \cdot C}{\delta \cdot \rho_B \cdot K_{вч}}}$	110,11
6	Ширина судна, м	B	$B = \frac{L}{A}$	16,12
7	Осадка судна, м	T	$T = \frac{B}{C}$	6,65

№ п/п	Назва величини	Позначення	Формула	Значення
8	Відношення висоти борту H до осадки T (приймаємо за прототипом)	J	$J = \frac{H}{T} = \frac{\bar{H}}{\bar{T}}$, п. 32 табл. 2.1	1,341
9	Висота борту, м	H	$H = J \cdot T$	8,92
10	Уточнена довжина судна, м	L	$L = \frac{D}{\delta \cdot \rho_B \cdot K_{вч} \cdot B \cdot T}$	110,11
11	Рівняння плавучості (для перевірки), т	D^*	$D^* = \rho_B \cdot \delta \cdot K_{вч} \cdot L \cdot B \cdot T$	10506,7
12	Водотоннажність у 1-му наближенні	$D = D_1$	вираз (5)	10506,7
13	Різниця між D і D^*	ε_D	$\varepsilon_D = \left \frac{D - D^*}{D} \right \cdot 100\%$	0,00

Прийняті параметри судна-проекту в першому наближенні представлені в табл. 2.8, які були зібрані з попередніх таблиць.

Таблиця 2.8 – Прийняті головні параметри судна-проекту в першому наближенні

№ п/п	Назва величини	Позначення	Значення
1	Водотоннажність, т	$D = D_1$	10506,7
2	Довжина між $\perp\perp$, м	L	110,11
3	Ширина, м	B	16,12
4	Осадка, м	T	6,65
5	Висота борту, м	H	8,92
6	Число Фруда	Fr	0,1871
7	Коефіцієнт загальної повноти	δ	0,851
8	Коефіцієнт повноти мідель-шпангоута	β	0,982
9	Коефіцієнт повноти вантажної ватерлінії	α	0,888

Очікувані потужності енергетичної установки при експлуатації $N_{e\text{ оч}}$ та на випробуваннях $N_{в\text{ оч}}$ визначаються залежностями

$$\left. \begin{aligned} N_{e\text{ оч}} &= \frac{D^{\frac{2}{3}} \cdot v_c^3}{C_e} = \frac{10506,7^{\frac{2}{3}} \cdot 12^3}{429,5} = 1930,2 \text{ кВт}; \\ N_{в\text{ оч}} &= \frac{D^{\frac{2}{3}} \cdot v_B^3}{C_B} = \frac{10506,7^{\frac{2}{3}} \cdot 12,2^3}{377,7} = 2306,4 \text{ кВт}; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

На основі значень потужностей (8) підбираємо енергетичну установку. Енергетичною установкою є один дизельний двигун внутрішнього згорання з наступними характеристиками, які представлені в табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Характеристики енергетичної установки судна-проекту в 1-му наближенні

№ п/п	Назва величини	Позначення	Значення
1	Марка двигуна	–	“Man B&W” 5S26MC
2	Потужність двигуна експлуатаційна, кВт	$N_{ед}$	2000
3	Потужність двигуна на випробуваннях, кВт	$N_{вд}$	–
4	Питома витрата палива, т/(кВт·год)	$q_{пал}$	$179 \cdot 10^{-6}$

2.3 Визначення масових та лінійних характеристик судна-проекту у другому наближенні

Для визначення масових показників судна-проекту у другому наближенні розв’яжемо рівняння мас як функцію головних розмірів, де приймаються головні розміри першого наближення з табл. 2.8. Маса розділів першого наближення взяті з табл. 2.4. У цьому рівнянні мас показники потужностей та маса судового двигуна взяті з табл. 2.9. В табл. 2.10 подано розрахунок допоміжних величин, необхідних для розв’язання рівняння мас у функції головних розмірів.

Таблиця 2.10 – Вимірники мас за розділами навантаження для другого наближення

№ п/п	Назва величини	Позначення	Формула	Значення
1	Відношення H/T	H/T	H/T	1,341
2	Коефіцієнт повноти об’єму судна по ВП	$\delta_{п}$	$\delta_{п} = \delta \cdot \frac{T}{H} + 1.05 \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{T}{H}\right)$	0,8717
3	Вимірник маси металевого корпусу	$q_{мк}$	$q_{мк} = \frac{P_{мк}}{\delta_{п} LBH}$	0,1450
4	Вимірник маси обладнання	$q_{об}$	$q_{об} = \frac{P_{об}}{(LBH)^{\frac{2}{3}}}$	0,8335
5	Вимірник маси енергетичної установки, т/кВт	$q_{еу}$	$q_{еу} = \frac{P_{еу}}{N_{в оч}}$	0,1356
6	Вимірник маси палива, т/(кВт·год)	$q_{пал}$	–	1,7900E-04

№ п/п	Назва величини	Позначення	Формула	Значення
7	Вимірник маси запасу водотоннажності	$q_{зв}$	$q_{зв} = \frac{P_{зв}}{D}$	0,0429
8	Вимірник маси запасу постачання	$q_{пос}$	$q_{пос} = \frac{P_{пос}}{D^{\frac{2}{3}}}$	0,2819
9	Коефіцієнт морського запасу	$k_{мз}$	–	1,2
10	Коефіцієнт, який враховує витрати палива на роботу допоміжних двигунів	k_d	–	1,15
11	Адміралтейський коефіцієнт при експлуатації	C_e	$C_e = \frac{D^{\frac{2}{3}} \cdot v_e^3}{N_{ед}}$	414,5
12	Адміралтейський коефіцієнт на випробуваннях	C_B	$C_B = \frac{D^{\frac{2}{3}} \cdot v_B^3}{N_{в оч}}$	377,7
13	Коефіцієнт в рівнянні мас	n	$n = 1 - q_{зв} - 0,966 q_{мк} \frac{\delta_n \cdot H}{\delta \cdot T}$	0,7647
14	Коефіцієнт в рівнянні мас	m	$m = q_{об} \left(\frac{H}{T} \cdot \frac{1}{\rho_B \cdot \delta} \right)^{\frac{2}{3}} + q_{пос} + q_{еу} \cdot \frac{v_B^3}{C_B}$	2,0441
15	Маса палива у 2-му наближенні, т	$P_{пал2}$	$P_{пал2} = q_{пал} N_{ед} \cdot \frac{Z}{v_e} k_{мз} \cdot k_d$	267,6

Рівняння мас у функції головних розмірів має вигляд

$$D \cdot \left(1 - q_{зв} - 0,966 q_{мк} \frac{\delta_n \cdot H}{\delta \cdot T} \right) = D^{\frac{2}{3}} \cdot \left(q_{об} \left(\frac{H}{T} \cdot \frac{1}{\rho_B \cdot \delta} \right)^{\frac{2}{3}} + q_{пос} + q_{еу} \cdot \frac{v_B^3}{C_B} \right) + \left. \begin{aligned} &+ P_{пал2} + P_B \Rightarrow \\ &n \cdot D = m \cdot D^{\frac{2}{3}} + P_{пал2} + P_B \Rightarrow \\ &n \cdot D - m \cdot D^{\frac{2}{3}} - P_{пал2} - P_B = 0, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де $P_{пал2}$ береться з табл. 2.10.

Вирішуючи рівняння (9) отримуємо водотоннажність у другому наближенні, яка становить

$$D_2 = D = 10454,8 \text{ т} \quad (10)$$

Різниця ε_2 між водотоннажністю у 1-му та 2-му наближеннях становить

$$\varepsilon_2 = \left| \frac{D_1 - D_2}{D_1} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{10506,7 - 10454,8}{10506,7} \right| \cdot 100\% = 0,49\%. \quad (11)$$

В другому наближенні приймаємо водотоннажність $D = D_2 = 10454,8$ т, визначену в (10), яка отримана шляхом вирішення нелінійного рівняння (9).

В табл. 2.11 наведено розподіл водотоннажності судна-проекту у другому наближенні по розділам масового навантаження, які отримані з рівняння (9).

Таблиця 2.11 – Розподіл по розділам масового навантаження судна-проекту у другому наближенні

№ п/п	Назва величини	Позначення	Формула	Значення
1	Маса металевого корпусу, т	$P_{\text{МК}}$	$P_{\text{МК}} = 0,966 q_{\text{МК}} \frac{\delta_n}{\delta} \cdot \frac{H}{T} \cdot D$	2011,3
2	Маса обладнання, т	$P_{\text{об}}$	$P_{\text{об}} = q_{\text{об}} \left(\frac{H}{T} \cdot \frac{1}{\rho_B \cdot \delta} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot D^{\frac{2}{3}}$	530,8
3	Маса енергетичної установки, т	$P_{\text{еу}}$	$P_{\text{еу}} = q_{\text{еу}} \cdot \frac{v_B^3}{C_B} \cdot D^{\frac{2}{3}}$	311,7
4	Маса палива, т	$P_{\text{пал}}$	п. 15 табл. 2.10	267,6
5	Маса запасу водотоннажності, т	$P_{\text{зв}}$	$P_{\text{зв}} = q_{\text{зв}} \cdot D$	448,5
6	Маса постачання, т	$P_{\text{пос}}$	$P_{\text{пос}} = q_{\text{пос}} \cdot D^{\frac{2}{3}}$	134,8
7	Маса баласту, т	$P_{\text{б}}$	–	0
8	Маса вантажу, т	$P_{\text{в}}$	(п. 1, 33 табл. 2.2)	6750
9	Сумарна маса, т	Σ_P	$\Sigma_P = P_{\text{МК}} + P_{\text{об}} + P_{\text{еу}} + P_{\text{пал}} + P_{\text{зв}} + P_{\text{пос}} + P_{\text{б}} + P_{\text{в}}$	10454,8

Як показує табл. 2.11 сумарна маса $\Sigma_P = 10454,8$ т не відрізняється від водотоннажності $D = D_2 = 10454,8$ т на жоден відсоток, що свідчить про правильність виконаних розрахунків.

В табл. 2.12 представлено розрахунок лінійних розмірів судна у другому наближенні, отримані з рівняння плавучості. В табл. 2.12 параметри, які відносяться до першого наближення взяті з табл. 2.8 і мають індекс «1».

Таблиця 2.12 – Визначення головних розмірів судна-проекту в другому наближенні

№ п/п	Назва величини	Позначення	Формула	Значення
1	Відношення ширини B до осадки T , (приймаємо за прототипом)	C	$C = \frac{B}{T} = \frac{B_1}{T_1}$	2,423
	Коефіцієнт виступаючих	$K_{\text{вч}}$	–	1,02

№ п/п	Назва величини	Позначення	Формула	Значення
	частин			
2	Відношення довжини L до ширини B проекту у 2-му наближенні	A	$A = \frac{L}{B} = \sqrt{l^3 \cdot \delta \cdot \frac{1}{C} K_{вч} \cdot \rho_B}$	6,982
3	Відношення довжини L до ширини B у 1-му наближенні	A_1	$A = \frac{L}{B} = \frac{L_1}{B_1}$	6,83
4	Прийняте відношення $A=L/B$	A	у судна з більшою швидкістю L/B є більшим; $\bar{v}_e = 13,3$ вуз $> v_e = 12,0$ вуз	6,83
5	Довжина судна з умов плавучості, м	L	$L = \sqrt[3]{\frac{D \cdot A^2 \cdot C}{\delta \cdot \rho_B \cdot K_{вч}}}$	109,93
6	Ширина судна, м	B	$B = \frac{L}{A}$	16,09
7	Осадка судна, м	T	$T = \frac{B}{C}$	6,64
8	Відношення висоти борту H до осадки T (приймаємо за 1-м наближенням)	J	$J = \frac{H}{T} = \frac{H_1}{T_1}$	1,341
9	Висота борту, м	H	$H = J \cdot T$	8,906
10	Уточнена довжина судна, м	L	$L = \frac{D}{\delta \cdot \rho_B \cdot K_{вч} \cdot B \cdot T}$	109,926
11	Рівняння плавучості (для перевірки), т	D^*	$D^* = \rho_B \cdot \delta \cdot K_{вч} \cdot L \cdot B \cdot T$	10454,8
12	Водотоннажність у 2-му наближенні	$D=D_2$	вираз (10)	10454,8
13	Різниця між D і D^*	ε_D	$\varepsilon_D = \left \frac{D - D^*}{D} \right \cdot 100\%$	0,0

З метою покращення гідродинамічних якостей судна та зменшення опору руху води, довжину судна L із п. 10 табл. 2.12 визначаємо при коефіцієнті загальної повноти $\delta = 0,774$ (табл. 2.5, п. 9). Таким чином

$$L = \frac{D}{\delta \cdot \rho_B \cdot K_{вч} \cdot B \cdot T} = \frac{10454,8}{0,774 \cdot 1,025 \cdot 1,02 \cdot 16,09 \cdot 6,64} = 120,93 \text{ м.} \quad (12)$$

В табл. 2.13 представлені остаточні параметри судна-прототипу та судна-проекту.

Таблиця 2.13 – Параметри судна-проекту у другому наближенні і судна прототипу

№ п/п	Назва величини	Позначення	Значення	
			проект	прототип
1	Водотоннажність, т	D	10455	8158

2	Довжина між $\perp\perp$, м	L	120,93	102,45
3	Ширина, м	B	16,09	15,00
4	Осадка, м	T	6,64	6,19
5	Висота борту, м	H	8,91	8,30
6	Коефіцієнт загальної повноти	δ	0,774	0,851
7	Коефіцієнт повноти мідель-шпангоута	β	0,982	0,970
8	Коефіцієнт повноти вантажної ватерлінії	α	0,888	0,888
9	Експлуатаційна швидкість, вузли	v_e	12	13,3
10	Швидкість на випробуваннях, вузли	v_v	12,2	13,5
11	Дальність плавання, миль	Z	6500	6000
12	Маса металевого корпусу, т	P_{mk}	2011	1554
13	Маса обладнання, т	$P_{об}$	531	444
14	Маса енергетичної установки, т	P_{ey}	312	358
15	Маса палива, т	$P_{пал}$	268	317
16	Маса запасу водотоннажності, т	$P_{зв}$	449	350
17	Маса постачання, т	$P_{пос}$	135	105
18	Маса баласту, т	$P_{б}$	0	680
19	Маса вантажу, т	P_v	6750	4350

В розділі 3 параметри навантаження розраховані для довжини судна $L = 109,93$ м

3 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ КОРПУСУ СУДНА ЗА ПРАВИЛАМИ КЛАСИФІКАЦІЙНОГО ТОВАРИСТВА УКРАЇНИ

3.1. Опис архітектурно-конструктивного типу судна

Проектоване судно є комбінованим суховантажем-лісовозом з кормовим розташуванням машинного відділення та житлової надбудови, з коротким баком, нахиленим надводним форштевнем і транцевою кормою. Судно має подвійне дно та подвійний борт, які набрані за поздовжньою системою конструкції. Кінцеві частини корпусу судна сформовані за поперечною системою набору. Флори і шпангоути розміщені через 4 шпациї в центральній частині судна. У цьому розділі визначено розміри поздовжніх в'язей корпусу універсального суховантажного судна відповідно до «Правил класифікації та будівництва морських суден». Початкові дані згідно з прийнятими позначеннями Регістру наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані

№	Найменування величини	Позначення	Значення
1	Довжина, м	L	109,93
2	Ширина, м	B	16,09
3	Висота борту, м	D	8,91
4	Осадка, м	d	6,64
5	Коефіцієнт загальної повноти	C_b	0,851
6	Коефіцієнт повноти площі мідель-шпангоута	C_m	0,982
7	Коефіцієнт повноти площі ВВЛ	C_w	0,888
8	Швидкість ходу експлуатаційна або специфікаційна, вузли	v_0	12
9	Відношення L/D	L/D	12,3
10	Відношення B/D	B/D	1,8

Відношення головних розмірів L/D та B/D пп. 9, 10 табл. 3.1 задовольняють вимогам $L/H \leq 18$, $B/H \leq 2,5$ для відношення головних розмірів. Для виготовлення суднового корпусу використано суднобудівну сталь з границею плинності $R_{eH}=235$ МПа, тому що довжина судна менша 130 м, а температура

експлуатації вища за -20°C . Основні механічні характеристики прийнятої сталі представлено в табл. 3.1.

Таблиця 3.2 – Основні механічні характеристики прийнятої сталі

№	Найменування величини	Позначення	Значення
1	Марка сталі	–	ВСт3сп
2	Границя плинності, МПа	R_{eH}	235
3	Коефіцієнт використання механічних властивостей	η	1
4	Нормативна границя плинності за нормальними напруженнями, МПа	$\sigma_n = \frac{235}{\eta}$	235
5	Нормативна границя плинності за дотичними напруженнями, МПа	$\tau_n = 0,57 \cdot \sigma_n$	134

В табл. 3.3 представлено розрахунок характерних розмірів мідель-шпангоута.

Таблиця 3.3 – Розміри мідель-шпангоута

№	Найменування величини	Позначення	Формула	Значення
1	Нормальна шпація, м	a_0	$a_0 = 0,002 \cdot L + 0,48$	0,70
2	Прийнята шпація, м	a_0		0,70
3	Підйом t лінії днища, м	t	$t = d \cdot (1 - C_m)$	0,12
4	Прийняте t , м	t		0,12
5	Розрахункова висота подвійного дна, м	h_2	$h_2 = \frac{L - 40}{570} + 0,04 \cdot B +$ $+ 3,5 \cdot \frac{d}{L} \geq 0,65$	0,98
6	Прийнята висота подвійного дна, м	h_2	–	1,00
7	Радіус заокруглення скули, м	R	$R = \sqrt{\frac{B \cdot t}{0,86}}$	1,50
8	Прийняте R , м	R	–	1,00
9	Ширина горизонтального кіля, мм	b_k	$b_k = 800 + 5L \leq 2000$	1350
10	Прийнята ширина горизонтального кіля, мм	b_k	–	2000

Внутрішнє дно на судні тягнеться від форпикової до ахтерпикової перегородки та від борту до борту. Крайній пояс внутрішнього дна (міждонний лист) є горизонтальним. Комінгс верхньої палуби розташований в одній площині з

днищевими стрингерами і співпадає з внутрішнім бортом. Місця розташування поздовжніх балок основного набору позначаються від діаметральної площини і не співпадають з пазами листів. Мінімальна відстань між пазами листів і лініями зварювання поздовжніх балок складає 75 мм. На рис. 3.1 зображено ескіз поперечного перерізу в масштабі, з позначенням монтажних з'єднань листових поясів борту та координат, необхідних для розрахунку міцності листових і балочних елементів корпусу судна.

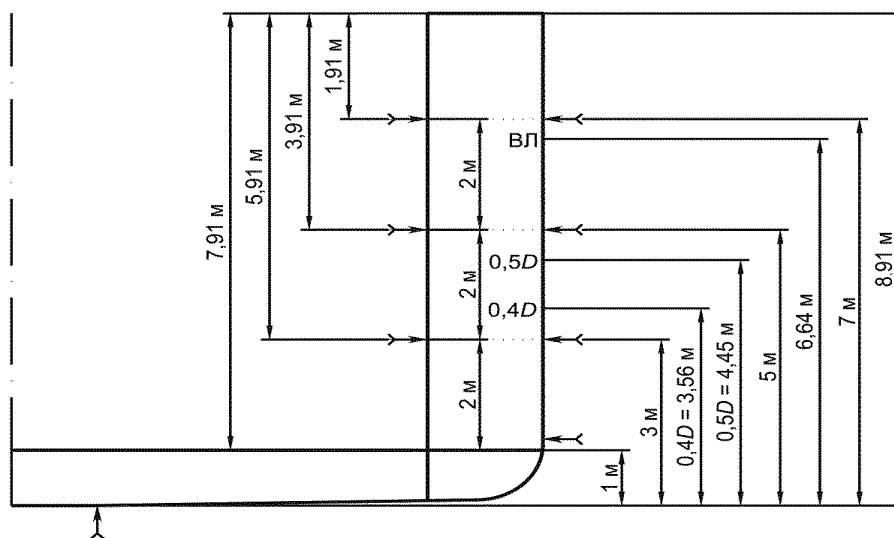


Рис. 3.1. Схема розташування листових поясів та характерні координати

3.2 Розрахункові навантаження

Розрахунковий статичний тиск P_{st} , кПа, для точок, які розташовані нижче ватерлінії, визначається за формулою

$$P_{st} = 10 \cdot z_i, \quad (1)$$

де z_i – відстань точок прикладання навантаження від ватерлінії вниз, м.

Розрахунковий тиск P , кПа, для точок прикладання навантаження, розташованих нижче ватерлінії, визначається за формулою

$$P = P_{st} + P_w, \quad (2)$$

а для точок прикладання навантаження, розташованих вище ватерлінії за формулою

$$P = P_w. \quad (3)$$

В табл. 3.4 наведено розрахунок навантажень від дії моря для міделевого перерізу.

Таблиця 3.4 – Залежності для розрахунку навантажень від дії моря

№	Найменування величини	Позначення	Формула	Значення
1	Відстань розглядуваного поперечного перерізу від ближнього (носового або кормового) перпендикуляра, м.	x_1	$x_1 = 0,5L$	54,96
2	Координата z_i уверх від рівня ВЛ, м	z_i	–	–
3	Координата z_i вниз від рівня ВЛ, м	z_i	–	–
4	Коефіцієнт, який приймається 1,0 для міделя; 0,8 – для поперечних перерізів у ніс від міделя; 0,5 – для поперечних перерізів в корму від міделя	k_x	–	1,00
5	Коефіцієнт	a_v	$a_v = \frac{0,8 \cdot v_0 \left(\frac{L}{10^3} + 0,4 \right)}{\sqrt{L}} + 1,5$	1,97
6	Коефіцієнт	a_x	$a_x = k_x \left(1 - 2 \frac{x_1}{L} \right) \geq 0,267$	0,27
7	Добуток $a_v \cdot a_x$	–	$a_v \cdot a_x \geq 0,6$	0,60
8	Коефіцієнт	C_w	$C_w = 10,75 - \left(\frac{300 - L}{100} \right)^{\frac{3}{2}}$ при $90 < L < 300$ м; $C_w = 10,75$ при $300 < L < 350$ м;	8,13
9	Хвильовий тиск на рівні ВЛ, кПа	P_{w0}	$P_{w0} = 5C_w \cdot a_v \cdot a_x$	24,39
10	Мінімальний тиск, кПа	P_{\min}	$P_{\min} = 0,03L + 5$	8,30
11	Тиск для точок вище ВЛ, кПа	P_w	$P_w = P_{w0} - 7,5 a_x z_i \geq P_{\min}$, z_i – за п. 2	–
12	Тиск для точок нижче ВЛ, кПа	P_w	$P_w = P_{w0} - \frac{1,5 C_w z_i}{d}$, z_i – за п. 3	–

В табл. 3.5 наведено формули, за якими проводився розрахунок навантажень від дії вантажу, який перевозиться.

Таблиця 3.5 – Залежності для розрахунку навантажень від дії вантажу та баласту

№	Найменування величини	Позначення	Формула	Значення
1	Відстань розглядуваної точки від поперечної площини, яка проходить через центр ваги судна, м	x_0	–	–
2	Відстань розглядуваної точки від діаметральної площини, м	y_0	–	–
3	Відстань по вертикалі розглядуваної точки прикладання навантаження від рівня вільної поверхні вантажу, м	z_i	–	–
4	Кут нахилу стінки до основної площини, рад	α	–	0,22
5	Питома вага вантажу для зерна пшениці, т/м ³	ρ_B	–	0,80
6	Прискорення вільного падіння, м/с ²	g	–	9,81
7	Кут внутрішнього тертя навалочного вантажу, град	$\varphi_{в.т.}$	–	28,00
8	Коефіцієнт	k_B	$k_{B1} = \sin^2 \alpha \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_{в.т.}}{2} \right) + \cos^2 \alpha,$ $k_{B2} = \cos \alpha,$ $k_B = \max(k_{B1}, k_{B2})$	0,98
9	Коефіцієнт	c	–	0,80
10	Метацентрична висота в найбільш несприятливих умовах експлуатації судна, м	h	$h = 0,07B$	1,13
11	Розрахункове значення кута диференту, град	ψ	$\psi = \frac{0,23}{1 + L \cdot 10^{-2}}$	0,11
12	Розрахункове значення крену, град	θ	$\theta = \frac{0,6}{1 + 0,5L \cdot 10^{-2}}$	0,39
13	Період кільової качки, с	T_K	$T_K = \frac{0,8\sqrt{L}}{1 + 0,4 \frac{v_0}{L} \left(\frac{L}{10^3} + 0,4 \right)}$	8,20
14	Період бортової качки, с	T_6	$T_6 = \frac{cB}{\sqrt{h}}$	12,13
15	a_{cz} – проекція прискорення центра ваги судна на вертикальну вісь у	a_{cz}	$a_{cz} = 0,2 \left(\frac{100}{L} \right)^{\frac{1}{3}} g$	1,90

№	Найменування величини	Позначення	Формула	Значення
	розглядуваній точці, м/с ²			
16	a_{kz} – проекції прискорень на вертикальну вісь у розглядуваній точці від кильової качки, м/с ²	a_{kz}	$a_{kz} = \left(\frac{2\pi}{T_k}\right)^2 \psi x_0$	–
17	a_{bz} – проекції прискорень на вертикальну вісь у розглядуваній точці від бортової качки, м/с ²	a_{bz}	$a_{bz} = \left(\frac{2\pi}{T_b}\right)^2 \theta y_0$	–
18	a_z – розрахункове прискорення у вертикальному напрямку, м/с ²	a_z	$a_z = \sqrt{a_{cz}^2 + a_{kz}^2 + 0,4a_{bz}^2}$	–
19	Розрахунковий тиск на конструкції вантажного трюму, кПа	P_B	$P_B = \rho_B g k_B \left(1 + \frac{a_z}{g}\right) z_i \geq 20 \text{ кПа}$	–
20	Відстань від настилу внутрішнього дна до верху повітряної трубки, м	$h_{п.т.}$	$h_{п.т.} = D - h_2$	7,91
21	Випробувальний тиск на внутрішнє дно, кПа	$P_{вип}$	$P_{вип} = 7,5 h_{п.т.}$	59,3
22	Тиск аварійного затоплювання на внутрішнє дно, кПа	$P_{а.з.}$	$P_{а.з.} = 10,5(d - h_2)$	59,2
23	Висота трубки над рівнем ВП, м	Δz	–	1,50
24	Відстань від ВП до розглядуваної точки	z_j	–	–
25	Питома густина морської води, т/м ³	ρ	–	1,025
26	Тиск запобіжного клапану, кПа	P_k	–	15
27	Тиск баласту на в'язь, кПа	$P_{бал1}$	$P_{бал1} = 0,75 \rho g(z_j + \Delta z)$	–
28	Тиск баласту на в'язь, кПа	$P_{бал2}$	$P_{бал2} = \rho g z_j + P_k$	–

В табл. 3.6, 3.7, 3.8 наведено величини тисків відповідно від дії моря та від дії вантажу і баласту в характерних точках, розрахованих відповідно за формулами (1), (2), (3) та табл. 3.4, 3.5. Для кожного поясу зовнішньої обшивки борту розраховано найбільший тиск, який має місце на нижній кромці кожного з поясів.

Таблиця 3.6 – Навантаження від дії моря в характерних точках

№	Відстань від ОП		Статичний тиск P_{st} , кПа	Хвильовий тиск P_w , кПа	Сумарний тиск $P = P_{st} + P_w$, кПа
	Опис	ζ , м			
1	Рівень ОП	0,00	66,4	12,2	78,6
2	0,4D	3,56	30,8	18,7	49,5
3	0,5D	4,45	21,9	20,4	42,3
4	Рівень ВЛ	6,64	0,0	24,4	24,4
5	Рівень ВП	8,91	0,0	19,9	19,9
6	Зовнішня обшивка борту, нижній пояс (примикає до скули)	1,00	56,4	14,0	70,4
7	Зовнішня обшивка борту, 2-й пояс від ОП	3,00	36,4	17,7	54,1
8	Зовнішня обшивка борту, 3-й пояс від ОП	5,00	16,4	21,4	37,8
9	Зовнішня обшивка борту, верхній пояс (примикає до ВП)	7,00	0,0	23,7	23,7

Таблиця 3.7 – Навантаження від дії вантажу в характерних точках

№	Опис	Координата, м			P_v , кПа, за п. 19 табл. 3.5
		x_0	y_0	z_i	
1	Подвійне дно в місці з'єднання з внутрішнім бортом	0	8,05	7,91	74,5
2	Обшивка внутрішнього борту, нижній пояс (примикає до скули)	0	8,05	7,91	26,9
3	Обшивка внутрішнього борту, 2-й пояс від ОП	0	8,05	5,91	20,1
4	Обшивка внутрішнього борту, 3-й пояс від ОП	0	8,05	3,91	20,0
5	Обшивка внутрішнього борту, верхній пояс (примикає до ВП)	0	8,05	1,91	20,0

Таблиця 3.8 – Навантаження від дії баласту

№	Опис	z_j , м, з табл. 3.5, п. 24	$P_{бал1}$, кПа, з табл. 3.5	$P_{бал2}$, кПа, з табл. 3.5	Найбільше $P_{бал} = \max(P_{бал1}, P_{бал2})$
1	Подвійне дно	7,91	71,0	94,5	94,5
2	Рівень зовнішньої обшивки днища (для ВК і стрингерів)	8,91	78,5	104,6	104,6
3	Обшивка внутрішнього борту, нижній пояс (примикає до скули)	7,91	71,0	94,5	94,5
4	Обшивка внутрішнього борту, 2-й пояс від ОП	5,91	55,9	74,4	74,4
5	Обшивка внутрішнього борту, 3-й пояс від ОП	3,91	40,8	54,3	54,3
6	Обшивка внутрішнього борту,	1,91	25,7	34,2	34,2

№	Опис	Z_j , М, з табл. 3.5, п. 24	$P_{бал1}$, кПа, з табл. 3.5	$P_{бал2}$, кПа, з табл. 3.5	Найбільше $P_{бал} = \max(P_{бал1}, P_{бал2})$
	верхній пояс (примикає до ВП)				

Таблиця 3.9 – Характерні навантаження на окремі конструкції

№	Найменування величини	Позначення	Формула	Значення
1	Тиск на ВП	$P_{вп1}$	$P_{вп1} = 0,7P_w$	13,9
2	Мінімальний тиск на ВП	P_{min}	$P_{min} = 0,015L + 7$	8,6
3	Прийнятий тиск на ВП	$P_{вп}$	$P_{вп} = \max(P_{вп1}, P_{min})$	13,9

На рис. 3.2 схематично в масштабі представлено епюри навантажень від дії моря, вантажу та баласту.

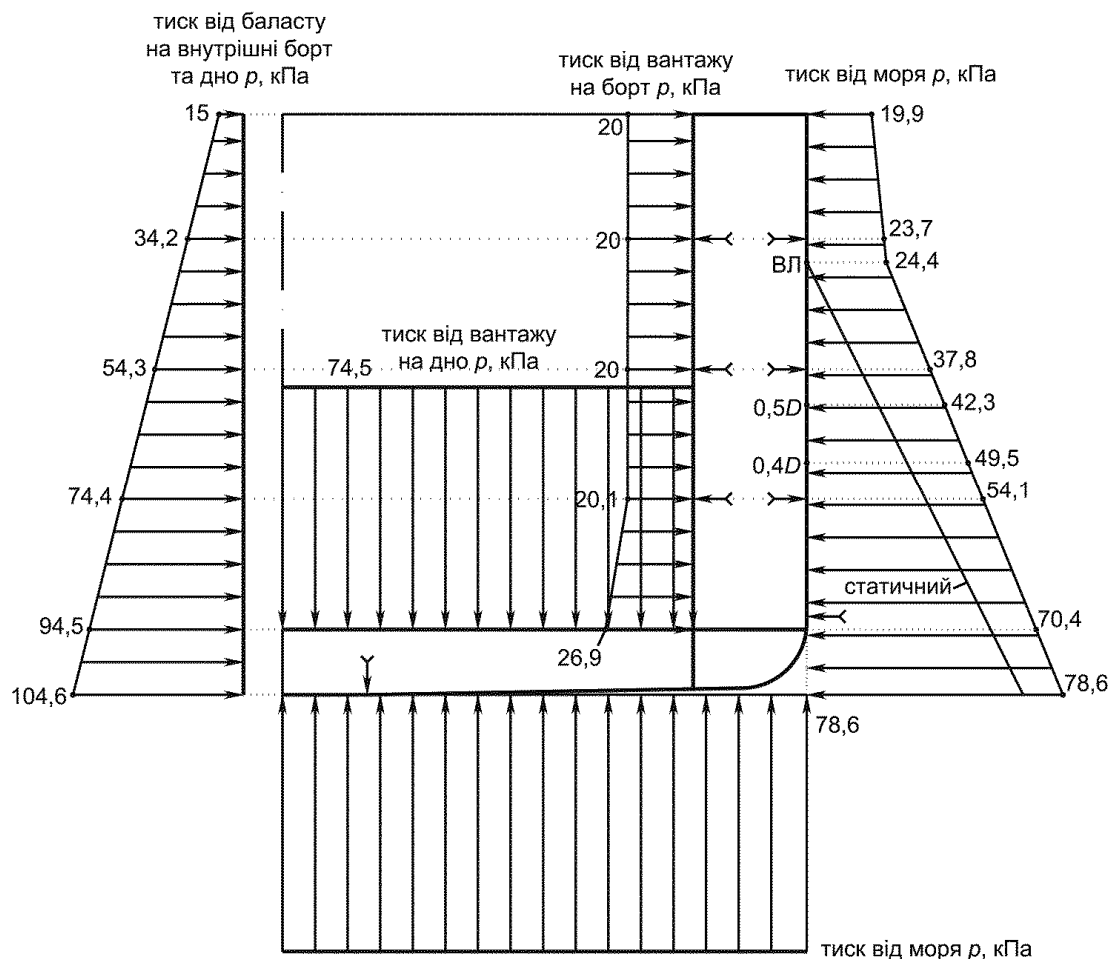


Рис. 3.2. Навантаження від дії моря, вантажу та баласту

3.3 Загальна поздовжня міцність судна

Параметри загальної поздовжньої міцності судна представлені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Розрахунок параметрів загальної поздовжньої міцності судна

№	Найменування величини	Позначення	Формула	Значення
1	Згинальний момент на тихій воді при перегині та прогині, кН·м	M_{sw}	$M_{sw} = \pm 76 C_w B L^2 (C_b + 0,7) \cdot 10^{-3}$	186369
2	Хвильовий згинальний момент, який викликає перегин КС, кН·м	M_{wh}	$M_{wh} = 190 C_w B L^2 C_b \cdot 10^{-3}$	255641
3	Хвильовий згинальний момент, який викликає прогин КС, кН·м	M_{ws}	$M_{ws} = -110 C_w B L^2 (C_b + 0,7) \cdot 10^{-3}$	-269744
4	Сумарний згинальний момент при перегині , кН·м	$M_{\Sigma h}$	$M_{\Sigma h} = M_{sw} + M_{wh}$	442010
5	Сумарний згинальний момент при прогині , кН·м	$M_{\Sigma s}$	$M_{\Sigma s} = -M_{sw} + M_{ws}$	-456113
6	Найбільший за модулем розрахунковий згинальний момент у розглядуваному перерізі, кН·м	M_T	$M_T = M_{sw} + M_w $	456113
7	Допустимі нормальні напруження, Мпа	σ	$\sigma = \frac{175}{\eta}$	175
8	Допустимі напруження на зріз, Мпа	τ	$\tau = \frac{110}{\eta}$	110
9	Мінімальний момент опору в середній частині КС, см ³	W_{min1}	$W_{min1} = \frac{M_T}{\sigma} 10^3$	2606360
10	Мінімальний момент опору в середній частині КС, см ³	W_{min2}	$W_{min2} = C_w B L^2 (C_b + 0,7) \eta$	2452221
11	Мінімальний момент інерції в середній частині судна, см ⁴	I_{min}	$I_{min} = 3 C_w B L^3 (C_b + 0,7)$	808690346
12	Коефіцієнт	f_1	–	1,00
13	Коефіцієнт	f_2	–	0,92
14	Коефіцієнт	f_3	–	0,74
15	Зрізуюча сила при перегині та прогині на тихій воді, кН	N_{sw}	$N_{sw} = \pm 30 C_w B L (C_b + 0,7) f_3 \cdot 10^{-2}$	4952
16	Додатня хвильова перерізуюча сила, кН	N_{w+}	$N_{w+} = +30 C_w B L (C_b + 0,7) f_1 \cdot 10^{-2}$	6692
17	Від'ємна хвильова перерізуюча сила, кН	N_{w-}	$N_{w-} = -30 C_w B L (C_b + 0,7) f_2 \cdot 10^{-2}$	-6157

3.4 Визначення товщин листів

У табл. 3.11 наведено обчислення мінімальних товщин, визначених на основі умов міцності. В загальному випадку товщина пластинчастих елементів корпусу судна має бути не менше 4 мм.

Таблиця 3.11 – Розрахунок мінімальних товщин

№	Найменування величини	Позначення	Формула	Значення
1	Зовнішня обшивка дна та бортів, мм	S_{\min}	$S_{\min} = (5,5 + 0,04 \cdot L) \cdot \sqrt{\eta}$	9,9
2	Настил верхньої палуби судна, мм	S_{\min}	$S_{\min} = (7 + 0,02 \cdot L) \cdot \sqrt{\eta}$	9,2
3	Настил другого дна, мм	S_{\min}	$S_{\min} = (5 + 0,035 \cdot L) \cdot \sqrt{\eta}$	8,8
4	Стінка вертикального кіля та днищевих стрингерів, мм	S_{\min}	$S_{\min} = 0,025 \cdot L + 7$	9,7
5	Стінка суцільного флору, мм	S_{\min}	$S_{\min} = 0,035 \cdot L + 6$	9,8
6	Мінімальна будівельна товщина елементів конструкцій в подвійному дні, мм	S_{\min}	$S_{\min} = 0,025 \cdot L + 5,5$	8,2
7	Обшивка внутрішнього борту, мм	S_{\min}	$S_{\min} = 0,03 \cdot L + 4,5$	7,8

Урахування зносу та корозії на розміри в'язей корпусу базується на нормуванні міцності до середини строку експлуатації конструкції. Необхідна товщина S , мм, для листових конструкцій обчислюється за формулою:

$$S = S' + \Delta S, \quad \Delta S = u \cdot (T - 12), \quad \text{мм}, \quad (4)$$

де S' – товщина листа, яка відповідає середині строку служби конструкції, мм; ΔS – запас на знос та корозію, мм; u – середньорічне зменшення товщини в'язі, мм/рік, внаслідок зносу та корозії (табл. 3.12); $T = 24$ – період служби конструкції, роки; якщо $T < 12$ років, то $\Delta S = 0$.

В табл. 3.12 наведено нормативні поправки до мінімальних товщин, які враховують знос та корозію, де ΔS визначено за (4).

Таблиця 3.12 – Нормативні поправки мінімальних товщин

№ пункту Правил	Елементи конструкції корпусу	u , мм/рік	ΔS , мм
1.1	Настил верхньої палуби	0,10	1,20
1.2	Настил нижніх палуб і платформ	0,11	1,32
2.1.2	Зовнішня обшивка борту	0,17	2,04
3.1.4	Зовнішня обшивка дна	0,20	2,40
4.1.2	Настил другого дна у вантажному трюмі	0,15	1,80
4.1.4	Настил другого дна в машинному відділенні	0,20	2,40
4.2.4	Міждонний лист	0,20	2,40
5.1.3	Обшивка поперечних перегородок і внутрішнього борту	0,13	1,56
6.1	Поздовжні балки палуби, бімси, рамні бімси, карлінгси палуб і платформ	0,12	1,44
7.1	Поздовжні балки борту, основні і рамні шпангоути, стояки, горизонтальні рами перегородок	0,10	1,20
8.2	Вертикальний кіль, днищеві стрингери, флори, поздовжні балки днища і другого дна у відсіках подвійного дна	0,20	2,40
9.1	Обшивка і набір надбудов, рубок і фальшборту	0,10	1,20

Розрахунок товщини пластинчастих елементів з умов міцності наведено в табл. 3.13, де для внутрішнього борту та обшивки взяті навантаження від баласту з табл. 3.8, тому що їх значення є більшими, аніж значення навантажень від дії вантажу в табл. 3.7 і навантажень в табл. 3.5.

Таблиця 3.13 – Розрахунок товщини пластинчатих елементів з умов міцності

№	Розрахункова точка	Менший розмір пластини a , м	Більший розмір пластини b , м	Коефіцієнт $k = 1,2 - 0,5(a/b)$	Розрахунковий тиск P , кПа	k_{σ}	m	$S' = m a k \sqrt{\frac{P}{k_{\sigma} \cdot \sigma_n}}$	ΔS , мм з табл. 3.12	Товщина пластини $S = S' + \Delta S$, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	НОД	0,7	2,8	1	78,6	0,6	15,8	8,26	2,4	10,7
2	ВК і стрингери	0,5	2,8	1	104,6	0,75	15,8	6,09	2,04	8,1
3	Настил внутрішнього дна	0,7	2,8	1	94,5	0,8	15,8	7,84	1,8	9,6
4	Обшивка внутрішнього	0,7	2,8	1	94,5	0,8	15,8	7,84	1,56	9,4

№	Розрахункова точка	Менший розмір пластини a , м	Більший розмір пластини b , м	Коефіцієнт $k = 1,2 - 0,5(a/b)$	Розрахунковий тиск P , кПа	k_{σ}	m	$S' = m a k \sqrt{\frac{P}{k_{\sigma} \cdot \sigma_n}}$	ΔS , мм з табл. 3.12	Товщина пластини $S = S' + \Delta S$, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	борту, нижній пояс (примикає до скули)									
5	Обшивка внутрішнього борту, 2-й пояс від ОП	0,7	2,8	1	74,4	0,8	15,8	6,96	1,56	8,5
6	Обшивка внутрішнього борту, 3-й пояс від ОП	0,7	2,8	1	54,3	0,8	15,8	5,94	1,56	7,5
7	Обшивка внутрішнього борту, верхній пояс (примикає до ВП)	0,7	2,8	1	34,2	0,8	15,8	4,72	1,56	6,3
8	Зовнішня обшивка борту, нижній пояс (примикає до скули)	0,7	2,8	1	70,4	0,6	15,8	7,82	2,04	9,9
9	Зовнішня обшивка борту, 2-й пояс від ОП	0,7	2,8	1	54,1	0,6	15,8	6,85	2,04	8,9
10	Зовнішня обшивка борту, 3-й пояс від ОП	0,7	2,8	1	37,8	0,563	15,8	5,91	2,04	8,0
11	Зовнішня обшивка борту, верхній пояс (примикає до ВП)	0,7	2,8	1	23,7	0,429	15,8	5,36	2,04	7,4
12	Настил ВП	0,7	2,8	1	13,9	0,6	15,8	3,47	1,2	4,7

В табл. 3.14 наведено розрахунок допоміжних величин, необхідних для розрахунку стійкості пластинчастих елементів.

Таблиця 3.14 – Розрахунок допоміжних величини для стійкості пластин

№	Найменування величини	Позначення	Формула	Значення
1	Відстань НО від ОП	e	$e = (0,34 + 0,02L \cdot 10^{-2})D$	3,22
2	Момент опору, см ³	W_d	п. 9 табл. 3.10	2,6064E+06
3	Момент інерції, см ⁴	I	$I = W_d(D - e) \cdot 10^2$	1,4809E+09

В табл. 3.15 пояснено формули та розрахункові величини, які використовуються для розрахунку товщин пластин з умов стійкості.

Таблиця 3.15 – Залежності для розрахунку товщини листів зовнішньої обшивки з умов стійкості

№	Найменування величини	Позначення	Формула
1	Відстань розрахункової точки від нейтральної осі (НО) зі своїм знаком, м. Примітка: вісь z – вниз	z_i	–
2	Стан: перегин/прогин	–	–
3	Сумарний згинальний момент, кН·м	$M_{\Sigma} = M_{wh}$, $M_{\Sigma} = M_{ws}$	пп. 4, 5 табл. 3.10 в залежності від стану: перегин чи прогин
4	Стискуючі напруження, МПа	σ_c	$\sigma_c = \frac{M_{\Sigma}}{I} z_i \cdot 10^5 \geq \frac{30}{\eta}$
5	Коефіцієнт запасу стійкості для пластин	k	–
6	Критичні напруження, МПа	σ_{cr}	$\sigma_{cr} = k \cdot \sigma_c$
7	Відношення	$\frac{\sigma_{cr}}{R_{eH}}$	$\frac{\sigma_{cr}}{R_{eH}}$
8	Ейлерові напруження	σ_e	$\sigma_e = \begin{cases} \sigma_{cr}, & \text{якщо } \frac{\sigma_{cr}}{R_{eH}} \leq 0,5; \\ \frac{0,25 \cdot R_{eH}^2}{R_{eH} - \sigma_{cr}}, & \text{якщо } \frac{\sigma_{cr}}{R_{eH}} > 0,5 \end{cases}$
9	Вільний бік пластини, м	a	–
10	Бік пластини, який сприймає нормальні стискальні напруження, м	b	–
11	Відношення сторін	γ	$\gamma = \frac{a}{b}$
12	Коефіцієнт нерівномірності розподілу нормальних напружень	ψ	–

№	Найменування величини	Позначення	Формула
	із табл. (1.6.5.5-1) Правил		
13	Коефіцієнт із табл. (1.6.5.5-1) Правил	ε	—
14	Коефіцієнт із табл. (1.6.5.5-1) Правил	n	$n = \frac{8,4}{\psi + 1,1}$, якщо $\gamma > 1$, $0 \leq \psi \leq 1$.
			$n = \varepsilon \left(\gamma + \frac{1}{\gamma} \right)^2 \cdot \frac{2,1}{\psi + 1,1}$, якщо $\gamma \leq 1$, $0 \leq \psi \leq 1$.
			$n = 10\psi^2 - 6,4\psi + 7,6$; якщо $\gamma > 1$; $-1 \leq \psi < 0$.
			$n = \varepsilon \left(10\psi^2 - 14\psi + 1,9(1 + \psi) \left(\gamma + \frac{1}{\gamma} \right)^2 \right)$; якщо $\gamma \leq 1$; $-1 \leq \psi < 0$.
15	Товщина без врахування корозії, мм	S'	$S' = b \sqrt{\frac{\sigma_e}{0,1854n}}$
16	Додаток товщини, який враховує корозію, мм	ΔS	З табл. 3.12.
17	Товщина пластини, мм	S	$S = S' + \Delta S$

Розрахунок товщин листів набору на стійкість наведено в табл. 3.16. В цьому випадку враховуються згинальні моменти, які викликають стиск відповідної в'язі. При визначенні товщин поясів борту з умов стійкості приймалися до уваги найбільші за значенням стискуєчі навантаження.

На рис. 3.3 наведено характерні координати при розрахунку стійкості.

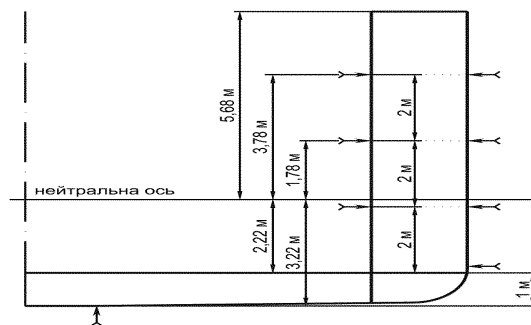


Рис. 3.3. Координати для розрахунку стійкості

Таблиця 3.16 – Розрахунок товщин пластин з умов стійкості

№	Розрахункова точка	z_i , м	Стан: перегин або прогин	M_{Σ}	σ_{cs} , МПа	k	$\sigma_{cr} = k \cdot \sigma_{cs}$, МПа	σ_{cr}/R_{eH}	σ_{e2} , МПа	a , м	b , м	$\gamma = a/b$	ψ	ε	n	S'	ΔS	S
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	НОД	3,22	перегин	442010	96,2	1	96,2	0,41	96,2	2,8	0,7	2	1	1,1	4,00	7,97	2,40	10,4
2	ВК і стрингери	3,22	перегин	442010	96,2	1	96,2	0,61	99,5	2,8	0,5	5,6	0,84	1,1	4,33	5,57	2,04	7,6
3	Настил внутрішнього дна	2,22	перегин	442010	66,4	1	66,4	0,28	66,4	2,8	0,7	4	1	1,1	4,00	6,62	1,80	8,4
4	Обшивка внутрішнього борту, нижній пояс (примикає до скули)	2,22	перегин	442010	66,4	1	66,4	0,28	66,4	2,8	0,7	4	0,68	1,1	4,72	6,10	1,56	7,7
5	Обшивка внутрішнього борту, 2-й пояс від ОП	- 1,78	прогин	- 456113	54,8	1	54,8	0,23	54,8	2,8	0,7	4	0,61	1,1	4,91	5,43	1,56	7,0
6	Обшивка внутрішнього борту, 3-й пояс від ОП	- 3,78	прогин	- 456113	116,4	1	116,4	0,50	116,4	2,8	0,7	4	0,81	1,1	4,40	8,36	1,56	9,9
7	Обшивка внутрішнього борту, верхній пояс (примикає до ВП)	- 5,68	прогин	- 456113	175,0	1	175,0	0,74	230,1	2,8	0,7	4	0,88	1,1	4,24	11,97	1,56	13,5
8	Зовнішня обшивка борту, нижній пояс (примикає до скули)	2,22	перегин	442010	66,4	1	66,4	0,28	66,4	2,8	0,7	4	0,68	1,1	4,72	6,10	2,04	8,1
9	Зовнішня обшивка борту, 2-й пояс від ОП	- 1,78	прогин	- 456113	54,8	1	54,8	0,23	54,8	2,8	0,7	4	0,61	1,1	4,91	5,43	2,04	7,5
10	Зовнішня обшивка борту, 3-й пояс від ОП	- 3,78	прогин	- 456113	116,4	1	116,4	0,50	116,4	2,8	0,7	4	0,81	1,1	4,40	8,36	2,04	10,4
11	Зовнішня обшивка борту, верхній пояс (примикає до ВП)	- 5,68	прогин	- 456113	175,0	1	175,0	0,74	230,1	2,8	0,7	4	0,88	1,1	4,24	11,97	2,04	14,0
12	Настил ВП	- 5,68	прогин	- 456113	175,0	1	175,0	0,74	230,1	2,8	0,7	4	1	1,1	4,72	11,35	1,20	12,6

В табл. 3.17 наведено остаточний вибір товщин листів.

Таблиця 3.17 – Остаточний вибір товщин листів

№	Назва листового елемента	Товщина S , мм				
		З умов міцності	З умов стійкості	Мінімальна за Регістром	Найбільша	Прийнята
1	НОД	10,7	10,4	9,9	10,7	11
2	ВК і стрингери	8,1	7,6	9,7	9,7	10
3	Настил внутрішнього дна	9,6	8,4	8,8	9,6	10
4	Обшивка внутрішнього борту, нижній пояс (примикає до скули)	9,4	7,7	7,8	9,4	10
5	Обшивка внутрішнього борту, 2-й пояс від ОП	8,5	7,0	7,8	8,5	9
6	Обшивка внутрішнього борту, 3-й пояс від ОП	7,5	9,9	7,8	9,9	16
7	Обшивка внутрішнього борту, верхній пояс (примикає до ВП)	6,3	13,5	7,8	13,5	20
8	Зовнішня обшивка борту, нижній пояс (примикає до скули)	9,9	8,1	9,9	9,9	10
9	Зовнішня обшивка борту, 2-й пояс від ОП	8,9	7,5	9,9	9,9	10
10	Зовнішня обшивка борту, 3-й пояс від ОП	8,0	10,4	9,9	10,4	17
11	Зовнішня обшивка борту, верхній пояс (примикає до ВП)	7,4	14,0	9,9	14,0	24
12	Настил ВП	4,7	12,6	9,2	12,6	24

Так як товщина настилу ВП приймається меншою ніж товщина борту в місці їх з'єднання, то ставимо палубний стрингер. Його розрахункова ширина становить

$$b_c = 5L + 800 \leq 1800 = 1350 \text{ мм.} \quad (5)$$

Ширину подвійного борту b_2 приймаємо рівною 1,045 м, тобто $b_2 = 1,045$ м. Комінгс розташовуємо на рівні внутрішнього борту. Товщину всієї ВП приймаємо

такою ж, як товщина борту на рівні ВП, тобто 20 мм (див. табл. 3.17). Товщину горизонтального кіля встановлюємо рівною $11 + 2 = 13$ мм. Обрані товщини ВП обґрунтовуються розташуванням механізмів на ВП, які потребують посиленого фундаменту; для борту – необхідністю виконання складних швартовних операцій.

3.5 Проектування ребер жорсткості набору

У табл. 3.18 наведено залежності, що застосовуються для визначення моменту опору поперечного перерізу балок катаного профілю за умовами міцності. Всі розрахунки міцності та стійкості балок конструкції проводяться з урахуванням приєднаного пояску обшивки. Тому геометричні характеристики поперечних перерізів балок конструкції визначаються для комбінованого перерізу катаного профілю з приєднаним пояском обшивки.

Таблиця 3.18 – Залежності для визначення моменту опору балок катаного профілю з умов міцності

№	Найменування величини	Позначення	Формула
1	Тиск, кПа	P	–
2	Відстань (шпація) між балками, які розглядаються, м	a	–
3	Прогін балки, м	l	–
4	Поперечне навантаження на балку, кН	Q	$Q = P \cdot a \cdot l$
5	Коефіцієнт згинального моменту	m	–
6	Коефіцієнт допустимих напружень	k_{σ}	–
7	Момент опору поперечного перерізу балки без урахування запасу на знос і корозію, см ³	W'	$W' = \frac{Q \cdot l \cdot 10^3}{m \cdot k_{\sigma} \cdot \sigma_n}$

№	Найменування величини	Позначення	Формула
8	Коефіцієнт	α_k	$\alpha_k = \begin{cases} 0,07 + \frac{6}{W'} \leq 0,25, \text{ при } W' < 200 \text{ см}^3; \\ \frac{1}{0,15} \left(0,01 + \frac{1}{W'} \right), \text{ при } W' \geq 200 \text{ см}^3. \end{cases}$
9	Поправка товщини на корозію і знос, мм	ΔS	З табл. 3.12
10	Поправка на корозію і знос, мм	ω_k	$\omega_k = 1 + \alpha_k \cdot \Delta S$
11	Мінімально необхідний момент опору поперечного перерізу балки з врахуванням корозії та зносу, см ³	W	$W = W' \cdot \omega_k$

В табл. 3.19 наведено розрахунок мінімальних моментів опору поперечних перерізів балок катаного профілю.

Таблиця 3.19 – Розрахунок мінімальних моментів опору балок катаного профілю

№	Опис	P , кПа	a , м	l ,м	Q , кН	m	k_σ	W'_3 , см ³	α_k	ΔS , мм	ω_k	W_3 , см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Балки НОД	78,6	0,7	2,8	154,1	12	0,45	339,9	0,0863	2,4	1,207	410,3
2	Балки ВК і стрингерів	104,6	0,5	2,8	146,4	12	0,75	193,9	0,1009	2,4	1,242	240,8
3	Балки настилу внутрішнього дна	94,5	0,7	2,8	185,2	12	0,6	306,5	0,0884	2,4	1,212	371,6
4	Балки обшивки внутрішнього борту, нижній пояс (примикає до скули)	94,5	0,7	2,8	185,2	12	0,65	282,9	0,0902	1,2	1,108	313,6
5	Балки обшивки внутрішнього борту, 2-й пояс від ОП	74,4	0,7	2,8	145,8	12	0,65	222,8	0,0966	1,2	1,116	248,6
6	Балки обшивки внутрішнього борту, 3-й пояс від ОП	54,3	0,7	2,8	106,4	12	0,65	162,6	0,1069	1,2	1,128	183,4
7	Балки обшивки внутрішнього борту, верхній пояс (примикає до ВП)	34,2	0,7	2,8	67,0	12	0,65	102,4	0,1286	1,2	1,154	118,2
8	Балки зовнішньої обшивки борту, нижній	70,4	0,7	2,8	138,0	12	0,65	210,8	0,0983	1,2	1,118	235,6

№	Опис	P , кПа	a , м	l ,м	Q , кН	m	k_{σ}	W'_{z3} , см ³	α_k	ΔS , мм	ω_k	W_{z3} , см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	пояс (примикає до скули)											
9	Балки зовнішньої обшивки борту, 2-й пояс від ОП	54,1	0,7	2,8	106,0	12	0,65	162,0	0,1070	1,2	1,128	182,8
10	Балки зовнішньої обшивки борту, 3-й пояс від ОП	37,8	0,7	2,8	74,1	12	0,65	113,2	0,1230	1,2	1,148	129,9
11	Балки зовнішньої обшивки, верхній пояс (примикає до ВП)	23,7	0,7	2,8	46,5	12	0,65	71,0	0,1546	1,2	1,185	84,1
12	Настил ВП	13,9	0,7	2,8	27,2	12	0,45	60,1	0,1698	1,2	1,204	72,4

Маючи мінімально необхідні моменти опору поперечних перерізів балок в табл. 3.19 за сортаментом ГОСТ 21937 – 76 «Полособульб гарачекатаний несиметричний для суднобудування» підбираємо необхідний профіль для кожного з пунктів табл. 3.19. Момент опору підбраного профілю з наявного сортаменту (ГОСТ 21937 – 76) повинен бути мінімально більшим за визначений в табл. 3.19 для кожного з пунктів.

Головний центральний момент інерції i , см⁴, складеного перерізу катаного профілю з приєднаним пояском обшивки визначається залежністю

$$i = i_{\text{пр}} + c \cdot t \cdot \left(\frac{t^2}{12} + \left(y_0 + \frac{t}{2} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{c \cdot t}{f_{\text{пр}} + c \cdot t} \right) \right), \quad (6)$$

де $i_{\text{пр}}$ – головний центральний момент інерції профілю з сортаменту, см⁴, який згідно сортаменту ГОСТ 21937 – 76 має позначення I_x ; c – ширина приєданого пояску, см; t – товщина приєданого пояску, см; y_0 – відстань від початку стінки до центру мас поперечного перерізу профілю, см (див. позначення сортаменту); $f_{\text{пр}}$ – площа поперечного перерізу профілю, см².

Мінімальний момент опору $W_{\text{мін}}$, см³, складеного перерізу катаного профілю з приєднаним пояском обшивки визначається залежністю

$$W_{\text{мін}} = \frac{c \cdot t^3 \cdot (c \cdot t + 4f_{\text{пр}}) + 12 \{ c \cdot t \cdot [f_{\text{пр}} \cdot y_0 (t + y_0) + i_{\text{пр}}] + f_{\text{пр}} \cdot i_{\text{пр}} \}}{6 \{ c \cdot t \cdot (t + 2h_{\text{пр}}) + 2f_{\text{пр}} (h_{\text{пр}} - y_0) \}}. \quad (7)$$

Площа складеного перерізу f , см^2 , катаного профілю з приєднаним пояском обшивки визначається залежністю

$$f = c \cdot t + f_{\text{пр}}. \quad (8)$$

Ейлерові напруження σ_e для ребер жорсткості визначаються залежністю

$$\sigma_e = \frac{206i}{f \cdot l^2}, \quad (9)$$

де i – момент інерції балки, см^4 , з приєднаним пояском, що розрахований для товщини, зменшеної на величину ΔS , (табл. 1.6.5.5-2 Правил); f – площа поперечного перерізу балки, см^2 , з приєднаним пояском, яка розрахована для товщини, зменшеної на величину ΔS , (табл. 1.6.5.5-2 Правил); l – прогін балки, м. Ширину приєданого пояса c при розрахунку i та f беремо як відстань між балками основного набору, тобто $c = 0,7$ м. Розрахунок ейлеревих напружень σ_e за (9) ведеться без врахування зносу та корозії. Величини i та f у формулі (9) визначені відповідно залежностями (6) та (8).

Критичні напруження σ_{cr} для балок набору визначаються залежністю

$$\sigma_{cr} = \begin{cases} \sigma_e \text{ при } \sigma_e \leq 0,5R_{eH}; \\ R_{eH} \left(1 - \frac{R_{eH}}{4\sigma_e} \right) \text{ при } \sigma_e > 0,5R_{eH}. \end{cases} \quad (10)$$

Використовуючи формули (6) – (10) і сортамент ГОСТ 21937 – 76 підбираємо необхідні профілі для кожного з пунктів табл. 3.19 і одночасно перевіряємо їх стійкість. Відповідні результати представлені в табл. 3.20.

Стійкість балок набору (і конструкцій взагалі) вважається забезпеченою, якщо виконується умова

$$k\sigma_c \leq \sigma_{cr}, \quad (11)$$

де $k = 1,1$ для балок набору; σ_c – визначається за 4-ю формулою табл. 3.15 і прийняті за стовбцем 6 табл. 3.16, що відповідає найбільш несприятливому випадку для балок кожного з поясів бортової обшивки.

Ширина приєданого пояску обшивки c , яка примикає до ребер жорсткості набору визначається наступною залежністю

$$c = \min\left(\frac{l}{6}; \frac{a_1 + a_2}{2}\right) = \min\left(\frac{2,8}{6} = 0,47; \frac{0,7 + 0,7}{2} = 0,7\right) = 0,47 \text{ м}, \quad (12)$$

де a_1, a_2 – відстані від розглядуваної балки до найближчих сусідніх балок того ж напрямку, розташованих по обидва боки від неї.

Для всіх балок значення ширини приєднаного пояску буде $c = 0,47$ м, яка визначена за (12). Навіть для балок ВК і стрингерів, де $a_1 = a_2 = 0,5$ м, $c = 0,47$ м.

Таблиця 3.20 – Необхідні катані профілі з сортаменту ГОСТ 21937 – 76

№	Опис	Ширина приєднаного пояску c , см	Товщина приєднаного пояску t , см	Необхідний момент опору W , см ³ , ст. 13, табл. 3.19	Параметри профілю з приєднаним пояском				Довжина прольоту L , м	σ_e	σ_{cr}	Стискуючі навантаження σ_c , МПа	Умова стійкості $k \cdot \sigma_c \leq \sigma_{cr}$
					Фактичний момент опору $W_{ф}$, см ³	№ за сортаментом	Момент інерції I , см ⁴	Площа f , см ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	РЖ НОД	47	1,1	410,3	439,0	246	7774,27	95,25	2,8	2144,6	228,6	96,2	так
2	РЖ ВК і стрингерів	47	1	240,8	250,0	20а	3942,81	74,36	2,8	1393,2	225,1	96,2	так
3	РЖ настилу внутрішнього дна	47	1	371,6	404,8	24а	7134,45	85,75	2,8	2186,1	228,7	66,4	так
4	РЖ обшивки внутрішнього борту, нижній пояс (примикає до скули)	47	1	313,6	321,7	22а	5382,81	79,82	2,8	1771,9	227,2	66,4	так
5	РЖ обшивки внутрішнього борту, 2-й пояс від ОП	47	0,9	248,6	268,3	20б	4057,33	73,66	2,8	1447,3	225,5	54,8	так
6	РЖ обшивки внутрішнього борту, 3-й пояс від ОП	47	1,6	183,4	186,5	18а	2754,61	69,18	2,8	1046,2	221,8	116,4	так
7	РЖ обшивки внутрішнього борту, верхній пояс (примикає до ВП)	47	2	118,2	122,0	14б	1653,15	110,8 5	2,8	391,9	199,8	175,0	так
8	РЖ зовнішньої обшивки борту, нижній пояс (примикає до скули)	47	1	235,6	250,0	20а	3942,81	74,36	2,8	1393,2	225,1	66,4	так

№	Опис	Ширина приєднаного пояску s , см	Говщина приєднаного пояску t , см	Необхідний момент опору W , см ³ , ст. 13, табл. 3.19	Параметри профілю з приєднаним пояском				Довжина прольоту l , м	σ_e	σ_{cr}	Стискуючі навантаження σ_c , МПа	Умова стійкості $k \cdot \sigma_c \leq \sigma_{cr}$
					Фактичний момент опору $W_{ф}$, см ³	№ за сортаментом	Момент інерції i , см ⁴	Площа f , см ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
9	РЖ зовнішньої обшивки борту, 2-й пояс від ОП	47	1	182,8	186,5	18а	2754,61	69,18	2,8	1046,2	221,8	54,8	так
10	РЖ зовнішньої обшивки борту, 3-й пояс від ОП	47	1,7	129,9	140,0	16а	1936,85	69,64	2,8	730,8	216,1	116,4	так
11	РЖ зовнішньої обшивки, верхній пояс (примикає до ВП)	47	2,4	84,1	112,1	14а	1580,04	126,8 5	2,8	327,3	192,8	175,0	так
12	РЖ настилу ВП	47	2,4	72,4	79,5	12	987,11	123,9 3	2,8	209,3	169,0	175,0	НІ

З табл. 3.20 видно, що стійкість РЖ настилу ВП не забезпечена. З умов стійкості підбираємо профіль момент інерції i і площа якого (з приєднаним пояском обшивки) забезпечать критичні напруження, які мінімально більші за $k \cdot \sigma_c = 1,1 \cdot 175 = 192,5$ МПа. Таким профілем є полособульб 14а, у якого $\sigma_e = 313,6$ МПа; $\sigma_{кр} = 191,0$ МПа; $i = 1580,04$ см⁴; $f = 126,85$ см² (з приєднаним пояском обшивки).

З табл. 3.20 видно, що відношення довжини балки $l = 2,8$ м до висоти профілю $h = 0,24$ м в найбільш несприятливому випадку для профілю 24б становить $2,8/0,24 = 11,7 > 10$. Це значить, що підбирати необхідну площу поперечного перерізу балок набору з умов міцності на зріз не потрібно.

3.6 Перевірка загальної поздовжньої міцності

На рис. 3.4 наведено схему еквівалентного бруса в масштабі. У міжбортовому просторі ставимо поздовжні горизонтальні платформи, які поперше додають жорсткості при крученні, тому що судно має велику ширину люка і поперечний переріз є по-суті незамкнутим; по-друге розділяють міжбортовий простір для розміщення там потрібних запасів і можливістю баластування за допомогою роздільних відсіків, які мають різну висоту. Товщину настилу поздовжніх платформ приймаємо $s = 20$ мм, а РЖ – полособульб $20a$. Таким чином буде гарантуватися їх міцність і стійкість. З метою уніфікації приймаємо РЖ ВП полособульб $20a$.

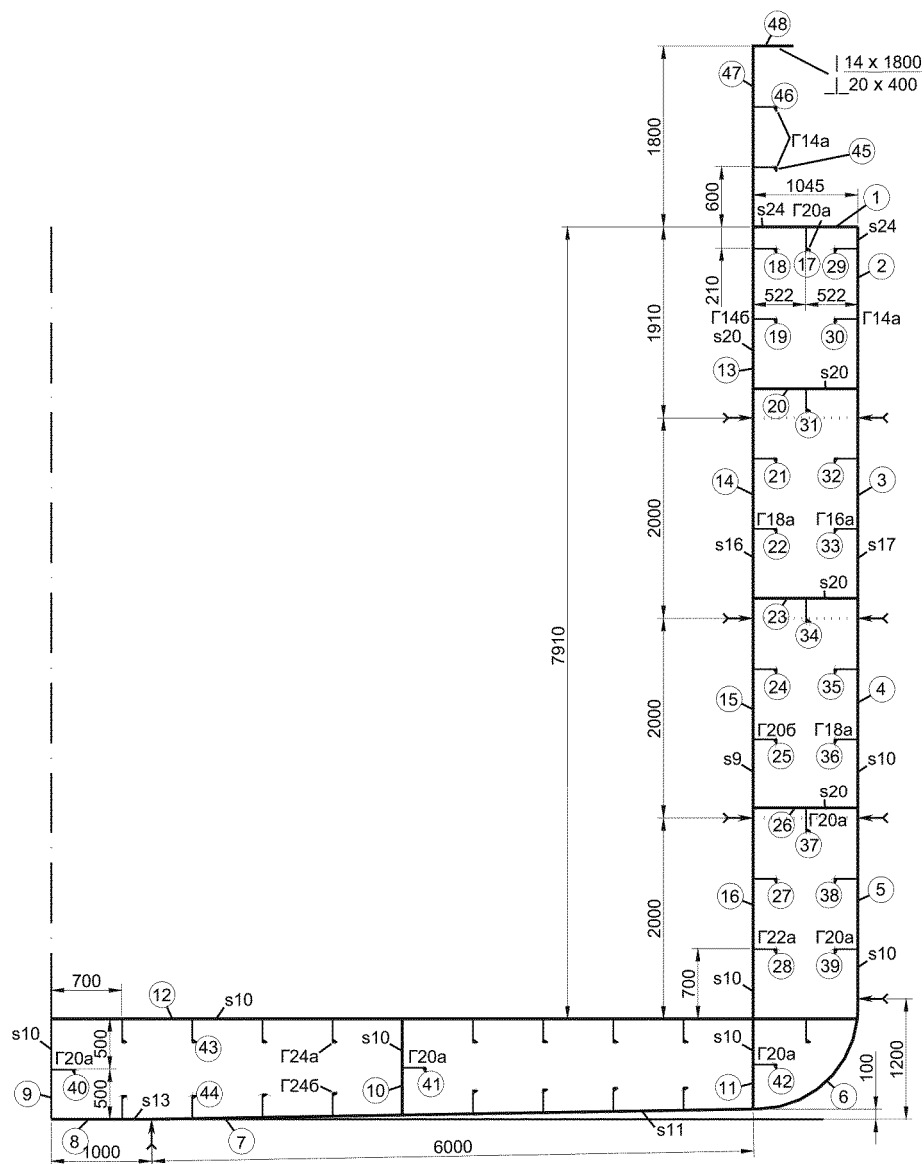


Рис. 3.4. Еквівалентний брус поперечного перерізу судна на міделі

В табл. 3.21 наведено розрахунок еквівалентного бруса (ЕБ) поперечного перерізу корпусу судна.

Прийняті наступні позначення: t – товщина листа, мм, або номер прокатного профілю; b – ширина листа або радіус округлення скули (тільки для скули), мм; z – відстань, м, від ЦМ в'язі до осі порівняння, яка прийнята на рівні ОП (ось z – вверх); ВП – верхня палуба; ЗОБ – зовнішня обшивка борту; НОД – наружна обшивка днища; ГК – горизонтальний кіль; ВК – вертикальний кіль; ВОБ – внутрішня обшивка борту; РЖ – ребро жорсткості.

Таблиця 3.21 – Таблиця еквівалентного бруса

№	Назва в'язі	t	b	z	n	Площа F , м ²	Статичний момент $S_x = F \cdot z$, м ³	Переносний момент інерції $I_{xir} = F \cdot z^2$, м ⁴	Власний момент інерції i , м ⁴
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	настил ВП	24	1045	8,91	1	2,5080E-02	2,2346E-01	1,9911E+00	1,2038E-06
2	ЗОБ верхн	24	1910	7,955	1	4,5840E-02	3,6466E-01	2,9008E+00	1,3936E-02
3	ЗОБ 3-й від ОП	17	2000	6	1	3,4000E-02	2,0400E-01	1,2240E+00	1,1333E-02
4	ЗОБ 2-й від ОП	10	2000	4	1	2,0000E-02	8,0000E-02	3,2000E-01	6,6667E-03
5	ЗОБ до скули	10	2000	2	1	2,0000E-02	4,0000E-02	8,0000E-02	6,6667E-03
6	Лист скули	11	1000	0,363	1	1,7279E-02	6,2788E-03	2,2816E-03	1,6366E-03
7	НОД	11	6000	0,05	1	6,6000E-02	3,3000E-03	1,6500E-04	6,6550E-07
8	ГК	13	1000	0	1	1,3000E-02	0,0000E+00	0,0000E+00	1,8308E-07
9	ВК	5	1000	0,5	1	5,0000E-03	2,5000E-03	1,2500E-03	4,1667E-04
10	Стрингер 1	10	961	0,52	1	9,6100E-03	4,9972E-03	2,5985E-03	7,3959E-04
11	Стрингер 2	10	898	0,545	1	8,9800E-03	4,8941E-03	2,6673E-03	6,0346E-04
12	Настил 2-го дна	10	8045	1	1	8,0450E-02	8,0450E-02	8,0450E-02	6,7042E-07
13	ВОБ верхн	20	1910	7,955	1	3,8200E-02	3,0388E-01	2,4174E+00	1,1613E-02
14	ВОБ 3-й від ОП	16	2000	6	1	3,2000E-02	1,9200E-01	1,1520E+00	1,0667E-02
15	ВОБ 2-й від ОП	9	2000	4	1	1,8000E-02	7,2000E-02	2,8800E-01	6,0000E-03
16	ВОБ до скули	10	2000	2	1	2,0000E-02	4,0000E-02	8,0000E-02	6,6667E-03
17	РЖ ВП	20а		8,7865	1	2,7360E-03	2,4040E-02	2,1123E-01	1,0834E-05
18	РЖ ВОБ	16а		8,7	1	1,7940E-03	1,5608E-02	1,3579E-01	4,5207E-06
19	РЖ ВОБ	16а		8	1	1,7940E-03	1,4352E-02	1,1482E-01	4,5207E-06
20	Лист платф.	20	1045	7,3	1	1,7940E-03	1,3096E-02	9,5602E-02	4,5207E-06
21	РЖ ВОБ	18а		6,6	1	2,2180E-03	1,4639E-02	9,6616E-02	7,1253E-06
22	РЖ ВОБ	18а		5,9	1	2,2180E-03	1,3086E-02	7,7209E-02	7,1253E-06
23	Лист платф.	20	1045	5,2	1	2,2180E-03	1,1534E-02	5,9975E-02	7,1253E-06
24	РЖ ВОБ	20б		4,5	1	3,1360E-03	1,4112E-02	6,3504E-02	1,2361E-05

№	Назва в'язі	t	b	z	n	Площа F , м ²	Статичний момент $S_x = F \cdot z$, м ³	Переносний момент інерції $I_{xtr} = F \cdot z^2$, м ⁴	Власний момент інерції i , м ⁴
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25	РЖ ВОБ	20б		3,8	1	3,1360E-03	1,1917E-02	4,5284E-02	1,2361E-05
26	Лист платф.	20	1045	3,1	1	3,1360E-03	9,7216E-03	3,0137E-02	1,2361E-05
27	РЖ ВОБ	22а		2,4	1	3,2820E-03	7,8768E-03	1,8904E-02	1,5749E-05
28	РЖ ВОБ	22а		1,7	1	3,2820E-03	5,5794E-03	9,4850E-03	1,5749E-05
29	РЖ ВОБ	14а		8,7	1	1,4050E-03	1,2224E-02	1,0634E-01	2,7151E-06
30	РЖ ВОБ	14а		8	1	1,4050E-03	1,1240E-02	8,9920E-02	2,7151E-06
31	РЖ платф.	20а		7,1765	1	2,7360E-03	1,9635E-02	1,4091E-01	1,0834E-05
32	РЖ ВОБ	16а		6,6	1	1,7940E-03	1,1840E-02	7,8147E-02	4,5207E-06
33	РЖ ВОБ	16а		5,9	1	1,7940E-03	1,0585E-02	6,2449E-02	4,5207E-06
34	РЖ платф.	20а		5,0765	1	2,7360E-03	1,3889E-02	7,0509E-02	1,0834E-05
35	РЖ ВОБ	18а		4,5	1	2,2180E-03	9,9810E-03	4,4915E-02	7,1253E-06
36	РЖ ВОБ	18а		3,8	1	2,2180E-03	8,4284E-03	3,2028E-02	7,1253E-06
37	РЖ платф.	20а		2,9765	1	2,7360E-03	8,1437E-03	2,4240E-02	1,0834E-05
38	РЖ ВОБ	20а		2,4	1	2,7360E-03	6,5664E-03	1,5759E-02	1,0834E-05
39	РЖ ВОБ	20а		1,7	1	2,7360E-03	4,6512E-03	7,9070E-03	1,0834E-05
40	РЖ ВК	20а		0,5	1	2,7360E-03	1,3680E-03	6,8400E-04	1,0834E-05
41	РЖ стрингера 1	20а		0,52	1	2,7360E-03	1,4227E-03	7,3981E-04	1,0834E-05
42	РЖ стрингера 2	20а		0,545	1	2,7360E-03	1,4911E-03	8,1266E-04	1,0834E-05
43	РЖ 2-го дна	24а		0,853	9	3,4875E-02	2,9748E-02	2,5375E-02	1,9953E-04
44	РЖ НОД	24б		0,186	8	3,4840E-02	6,4802E-03	1,2053E-03	1,9830E-04
45	РЖ комінгса	14а		9,51	1	1,4050E-03	1,3362E-02	1,2707E-01	2,7151E-06
46	РЖ комінгса	14а		10,11	1	1,4050E-03	1,4205E-02	1,4361E-01	2,7151E-06
47	стінка комінгса	14	1800	9,81	1	2,5200E-02	2,4721E-01	2,4251E+00	6,8040E-03
48	полка комінгса	20	400	10,71	1	8,0000E-03	8,5680E-02	9,1763E-01	2,6667E-07
						Σ_1	Σ_2	Σ_3	
						0,6226	2,2961	15,9010	

В табл. 3.22 наведено розрахунок основних геометричних характеристик поперечного перерізу еквівалентного бруса на основі табл. 3.21.

Таблиця 3.22 – Розрахунок геометричних характеристик поперечного перерізу еквівалентного бруса

№	Найменування величини	Позначення	Формула	Значення
1	Площа, м ²	F	$F = 2 \cdot \Sigma_1$	1,2453
2	Відстань НО від ОП, м	e	$e = \frac{\Sigma_2}{\Sigma_1}$	3,69

№	Найменування величини	Позначення	Формула	Значення
3	Момент інерції, м ⁴	I	$I = 2(\Sigma_3 - e^2 \cdot \Sigma_1)$	14,8667
4	Відстань від ОП до крайньої верхньої в'язі, м	z_{\max}	з табл. 3.21	10,71
5	Відстань від НО до НОД, м, за модулем	$ z_b $	$ z_b = e $	3,69
6	Відстань від НО до ВП, м, за модулем	$ z_d $	$ z_d = z_{ВП} - e $	5,22
7	Момент опору днища, м ³	W_b	$W_b = \frac{I}{ z_b }$	4,0313
8	Момент опору ВП, м ³	W_d	$W_d = \frac{I}{ z_d }$	2,8468
9	Мінімальний момент опору, м ³	W	$W = \min(W_b, W_d)$	2,8468

В табл. 3.23 наведено порівняння дійсних геометричних характеристик еквівалентного бруса з мінімальними, які взяті з пп. 9, 10, 11 табл. 3.10.

Таблиця 3.23 – Порівняння дійсних геометричних характеристик еквівалентного бруса з мінімальними

№	Найменування величини	Позначення	Формула	Значення
1	Момент опору нормативний мінімальний 1-й, см ³	$W_{\min 1}$	п. 9 табл. 3.10	2606360
2	Момент опору нормативний мінімальний 2-й, см ³	$W_{\min 2}$	п. 10 табл. 3.10	2452221
3	Момент інерції мінімальний, см ⁴	I_{\min}	п. 11 табл. 3.10	808690346
4	Момент опору нормативний мінімальний, см ³	W_{\min}	$W = \max(W_{\min 1}, W_{\min 2})$	2606360
5	Момент опору днища ЕБ, см ³	W_b	п. 7 табл. 3.22	4031313
6	Момент опору ВП ЕБ, см ³	W_d	п. 8 табл. 3.22	2846823
7	Момент інерції ЕБ, см ⁴	I	п. 3 табл. 3.22	14866677105181
8	Виконання умови	–	$W_b > W_{\min}$	так
9	Виконання умови	–	$W_d > W_{\min}$	так
10	Виконання умови	–	$I > I_{\min}$	так

Як видно з табл. 3.23 всі нормативні вимоги до значень геометричних характеристик ЕБ виконуються.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ І СТІЙКОСТІ ПЕРЕКРИТТЯ ВЕРХНЬОЇ ПАЛУБИ З ВРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ

4.1 Загальні положення

В рамках даного розділу будуть проведені серійні розрахунки при варіюванні числа поздовжніх і поперечних балок (бімсів) з метою виявлення тенденції зміни маси перекриття від числа вказаних балок. Для кожного з фіксованих чисел балок розглядатиметься можливість застосування таких профілів як катаних, зварних, полоси з метою вибору найдешевшого варіанту собівартості виготовлення, враховуючи реальні технологічні процеси. Буде розроблено принципову технологію виробництва і відповідну масштабовану модель оцінки вартості і часу виготовлення перекриття секції ВП в залежності від параметрів.

Досліджується регулярне палубне перекриття (рис. 4.1), з рівномірно розташованими поздовжніми та поперечними балками. Таке перекриття розташоване між люками. Товщина настилу ВП в межах перекриття постійна.

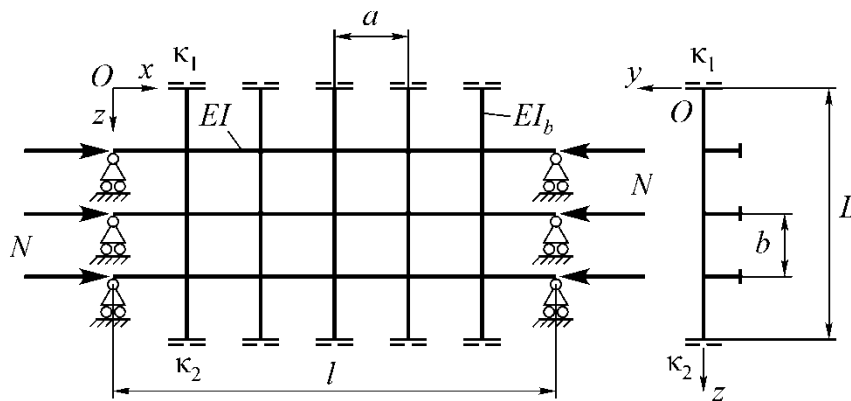


Рис. 4.1 – Регулярне палубне перекриття

На рис. 4.1 позначено наступне: $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па – модуль Юнга для сталі; I, I_b – головні центральні моменти інерції відповідно поздовжніх та поперечних РЖ (бімсів), які поки невідомі і є одним із об'єктів дослідження; $l = 12,0$ м – довжина відсіку; $L = 14,0$ м; $b = 0,7$ м – шпация; a – відстань між бімсами, яка буде

варіюватися; $\kappa_1 = \kappa_2 = 1$, так як кінці бiмсiв закрiпленi мiж подвiйними бортами, що iмiтує жорстке зацмлення, хоча насправдi $\kappa_{1,2} < 1$, т.я. має мiсце податливiсть бортового перекриття, але дослiдити цю податливiсть в рамках даного дослiдження не представляється можливим, i бiльш того це дослiдження не є доцiльним.

В рамках дослiдження буде варіюватися:









- кiлькiсть бiмсiв n_b , що потягне за собою варіювання величини a (рис. 4.1);
- кiлькiсть поздовжнiх РЖ n_p , що потягне за собою варіювання величини b (рис. 4.1).

Для фiксованих n_b i n_p виконуються наступнi процедури.

1) Визначення товщини настилу ВП з умов мiцностi i стiйкостi шляхом розрахунку окремо взятої пластини, видiленої в рамках жорсткого прямокутного контуру мiж поздовжнiми та поперечними балками (бiмсами).

2) Визначення мiнiмально необхідних: осьового моменту опору та головного центрального моменту iнерцiї поперечного перерiзу поздовжньої балки ВП вiдповiдно з умов мiцностi i стiйкостi. За визначеними моментами опору та iнерцiї пiдбираються профiлi вказанi в табл. 4.1. При чому пiдбiр профiлiв балок вiдбувається з врахуванням приєднаного пояску обшивки, до якої ця балка прикрiплена. Останнє положення застосовується для всiх балок в рамках виконуваної роботи.

Таблиця 4.1 – Профiлi поперечного перерiзу балок перекриття

№	Назва профiлю	Ескiз iзольованого профiлю	Ескiз профiлю з приєднаним пояском обшивки	Стандарт
1	2	3	4	5
1	Полособульб несиметричний			ГОСТ 21937 – 76
2	Полособульб симетричний			ГОСТ 9235 – 76
3	Тавр зварний			РД 5.9373 – 80
4	Полоса			–

Для останнього варіанту табл. 4.1 розміри полоси додатково підбираються з умов забезпечення її стійкості, приймаючи цю полосу в якості пластини з вільною кромкою (табл. 4.2, схема 2). При цьому втрата стійкості плоскої форми згину для балки з таким поперечним перерізом (на основі полоси) в реальних умовах практично не реалізується, тому що стержнева ідеалізація є лише моделлю, і балки не є ізольованими одна від одної. Ці балки можуть мати лише переміщення (прогини) перпендикулярні до площини настилу. Боковим переміщенням перешкоджає настил, який є по суті армованою пластиною. А пластина може мати лише переміщення перпендикулярні до своєї площини.

Використання полоси замість прокатного або зварного таврового профілю може бути дешевшим, а тому необхідно дослідити це питання.

3) Визначення мінімально необхідного осьового моменту опору поперечного перерізу поперечної балки ВП (бімса) з умов міцності шляхом розрахунку ізольованої балки і підбір відповідних поперечних перерізів згідно табл. 4.1.

4) Визначення критичного моменту інерції бімса з умов стійкості, розглядаючи його роботу у складі перекриття.

5) Після всіх розрахунків з умов міцності і стійкості остаточно приймаються найбільші розміри (номера профілів) відповідних поперечних перерізів для фіксованих n_6 і n_{II} .

6) Розрахунок маси перекриття зі всіма балками на настилі.

7) Розрахунок довжин профілів кожного виду з метою можливості подальшого розрахунку вартості обробки кромки та приварювання цих профілів до настилу; розрахунок довжин стиків листів.

Після переборів визначених множин n_6 і n_{II} обирається варіант, який забезпечує найменшу масу перекриття і найменшу собівартість виготовлення.

Положення для розрахунку пластини ВП з умов міцності. Як вже було сказано, вантажем, який перевозиться на палубі є важкі породи дерева, типу дуб, бук, ясен тощо. Густина для такого вантажу була прийнята 800 кг/м^3 . Висота вантажу, який може перевозитися на ВП становить $1/3$ найбільшої ширини судна.

Тиск від вантажу на ВП будемо вважати рівномірно розподіленим по полю всього перекриття. Величина тиску на ВП p , Па, згідно вказаних положень становить

$$p = 800 \cdot \frac{1}{3} \cdot 16,1 \cdot 9,81 = 42117,6 \approx 43000 \text{ Па}, \quad (1)$$

де 16,1 м – ширина судна найбільша.

При визначені товщини пластини з умов міцності розглядається модель жорсткої прямокутної пластини, всі кромки якої є жорстко защемленими (рис. 4.2), а поле пластини зазнає рівномірного зовнішнього тиску від дії вантажу, який розташований на палубі (тобто лісу).

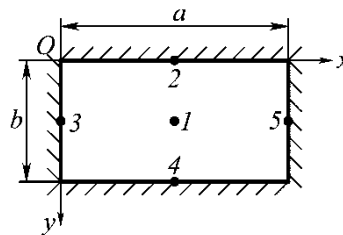


Рис. 4.2 – Розрахункова схема пластини для розрахунку міцності

Практика розрахунків показує, що найбільш напруженою точкою пластини на рис. 4.2 є точка 2, де діє найбільший за модулем згинальний момент з поміж усіх інших моментів, визначених в інших точках. При визначені товщини пластини з умов міцності до уваги приймається тільки згинальний момент. На рис. 4.2 b – завжди коротка сторона пластини.

Мінімальна товщина $t_{\min 1}$ пластини з умов міцності визначається за формулою

$$t_{\min 1} = \sqrt{\frac{6 \cdot v_{22} p b^2}{[\sigma]}}, \quad (2)$$

яка впливає з формул (19.63) і (18.34) [5], де v_{22} – коефіцієнт, який визначається з табл. 19.3 [5]; $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$ – допустимі напруження.

Положення для розрахунку пластин ВП з умов стійкості. Розрахункові схеми та необхідні формули для розрахунку стійкості пластин, які будуть мати місце в дослідній частині представлені в табл. 4.2. Пластині настилу ВП відповідає схема №1.

Таблиця 4.2 – Залежності для ейлеревих напружень пластин

№	Пояснення і схема	Формула для ейлеревих напружень σ_e	Формула для товщини
1	<p>Поздовжня система набору</p>	$\sigma_e = 80 \left(\frac{100t}{a} \right)^2$	$t = 1,118 \cdot 10^{-3} \cdot a \sqrt{\sigma_e}$
2	<p>Вільні фланці при поздовжній системі набору</p>	$\sigma_e = 8,4 \left(\frac{100t}{a} \right)^2$	$t = 3,4503 \cdot 10^{-3} \cdot a \sqrt{\sigma_e}$

Пояснення для табл. 4.2 наступні: l – поперечні в'язі, такі як бімси; 2 – поздовжні в'язі, такі як поздовжні РЖ; t – товщина, м; a – коротка сторона, м; b – довга сторона, м; $\sigma = \sigma_c$ – стискуючі напруження від загального згину корпусу судна, МПа.

Критичні $\sigma_{кр}$ та ейлерові σ_e напруження для пластин і балок при розрахунках стійкості можуть бути розраховані за нижче приведеними залежностями [6]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{кр} &= \varphi \cdot \sigma_e; \quad \varphi = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma_e}; \quad \sigma_e = \frac{\sigma_{кр}}{\varphi}; \\ \sigma_{кр} &= \text{th} \left(1,1 \frac{\sigma_e}{\sigma_s} \right) \sigma_s; \quad \sigma_e = \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_s} + 2 \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_s} \right)^{10} \right) \sigma_s. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де $\sigma_s = 235$ МПа – границя плинності.

Формули (3) зручні тим, що за ними можна визначати $\sigma_{кр}$ за відомими σ_e і навпаки. При чому остання формула для σ_e не виводиться з передостанньої формули для $\sigma_{кр}$, але дає дуже близькі значення ейлеревих напружень до виведеної (формули для σ_e з передостанньої формули для $\sigma_{кр}$). Наявність саме

залежності $\sigma_e = \sigma_e(\sigma_{кр})$ дуже спрощує розрахунки і дозволяє в більшості випадків використовувати алгебраїчні вирази. Більшість формул розроблені саме для визначення критичних напружень за відомими ейлеревими виду $\sigma_{кр} = \sigma_{кр}(\sigma_e)$, і не з усіх цих формул можна отримати зворотну залежність виду $\sigma_e = \sigma_e(\sigma_{кр})$. Якщо є залежність тільки $\sigma_{кр} = \sigma_{кр}(\sigma_e)$ і отримання $\sigma_e = \sigma_e(\sigma_{кр})$, то при вирішенні задач на отримання геометричних параметрів елементів з умов стійкості необхідно вирішувати нелінійне рівняння побудоване на основі виразу $\sigma_{кр} = \sigma_{кр}(\sigma_e)$, де σ_e є змінною, що є більш трудомістким.

Для забезпечення надійності розрахунків стійкості стискуючі напруження σ_c приймаємо рівними 0,95 границі плинності σ_s . Тобто вважається, що стискуючі напруження практично дорівнюють границі плинності при дії граничного моменту. У свою чергу критичні напруження дорівнюють стискуючим

$$\sigma_c = \sigma_{кр} = 0,95 \cdot \sigma_s. \quad (4)$$

При визначенні товщини пластини з умов стійкості спершу визначаємо ейлерові напруження σ_e за 4-ю формулою (3), а потім за потрібною формулою з табл. 4.2 знаходимо необхідну товщину пластини t_{min2} з умов стійкості. Із значень обчислених товщин t_{min1} за (2) і t_{min2} за табл. 4.2 обираємо більше, яке округлюємо до найближчого більшого згідно обраного стандарту. Послідовність підбору остаточної товщини пластини наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Алгоритм визначення необхідної товщини пластини настилу ВП

№	Пояснення	Формула	Значення
1	Границя плинності	σ_s	235
2	Допустимі напруження матеріалу пластини (сталі) з умов міцності, Па	$[\sigma]$	$160 \cdot 10^6$
3	Тиск на поле пластини, Па	p	43000
4	Стискуючі напруження, МПа	$\sigma_c = \sigma_{кр} = 0,95 \cdot \sigma_s$	223,25
5	Коротка сторона пластини, м	b	–
6	Довга сторона пластини, м	a	–
7	Відношення	$\gamma = a/b$	–
8	Коефіцієнт	v_{22} за табл. 19.3 [5]	–
9	Мінімально необхідна товщина t_{min1} , м, пластини з умов міцності	$t_{min1} = \sqrt{\frac{6 \cdot v_{22} p b^2}{[\sigma]}}$	–

№	Пояснення	Формула	Значення
10	Ейлерові напруження σ_e , МПа, за відомими критичними	$\sigma_e = \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_s} + 2 \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_s} \right)^{10} \right) \sigma_s$	–
11	Мінімально необхідна товщина t_{min2} , М, пластини з умов стійкості	$t_{min2} = 1,118 \cdot 10^{-3} \cdot b \sqrt{\sigma_e}$	–
12	Найбільша товщина t , м	$t = \max(t_{min1}, t_{min2})$	–
13	Прийнята товщина, мм	округлюється через 0,5мм при товщині листа від 4мм до 20мм і через 1мм для листів більше 20мм	–

Положення для розрахунку РЖ з умов міцності і стійкості. При розрахунку міцності торці поздовжніх балок набору вважаються жорстко защемленими, а в прольоті діє рівномірно розподілене навантаження q (рис. 4.3, а). При розрахунку стійкості торці балок набору вважаються вільно обпертими на жорсткі шарнірні опори, прольот вільний від будь-яких навантажень, при цьому торці стискаються рівномірною стискаючою силою (рис. 4.3, б).

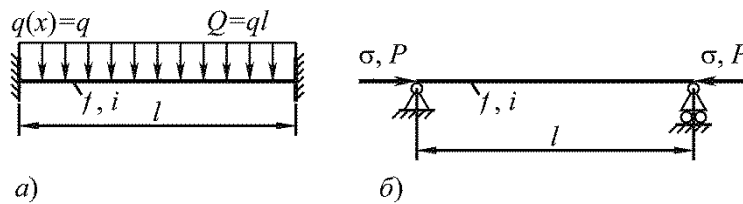


Рис 4.3. Розрахункові схеми балки набору: а – для розрахунку міцності; б – для стійкості

Поздовжні балки набору розраховуються з врахуванням приєднаного пояску обшивки, ширина якого c , м, визначається залежністю [7], яка в нашому випадку згідно рис. 4.1 запишеться

$$c = \min\left(\frac{a}{6}; b\right). \quad (5)$$

Для жорстко защемленої балки по торцях і рівномірній дії розподіленого навантаження q в прольоті найбільш небезпечний переріз має місце в жорсткому защемленні. Згинальний момент в цьому небезпечному перерізі згідно позначень рис. 4.1 становить

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{Q \cdot a}{12} = \frac{q \cdot a^2}{12} = \frac{c \cdot p \cdot a^2}{12}; \\ Q &= q \cdot a; \quad q = c \cdot p, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де Q – головний вектор розподіленого навантаження q , Н.

Умова міцності балки за нормальними напруженнями має вигляд

$$\sigma_{РЖ} \leq [\sigma], \quad (7)$$

де $\sigma_{РЖ}$ – найбільші нормальні напруження для РЖ, що діють у найвіддаленішій точці від НО РЖ, які визначаються залежністю

$$\sigma_{РЖ} = \frac{M}{W_{\phi \min}}, \quad (8)$$

де $W_{\phi \min}$ – фактичний (мінімальний) момент опору, з врахуванням приєднаного пояску обшивки, м³.

З врахуванням формул (7), (8) необхідний мінімальний момент інерції може бути визначений із залежності

$$W_{\phi \min} \geq \frac{M}{[\sigma]}. \quad (9)$$

Ейлерові напруження σ_e , Па, для балки на рис. 4.3, б, визначаються залежністю

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E \cdot i}{f \cdot l^2} \Rightarrow \sigma_e = \frac{\pi^2 E \cdot i}{f \cdot a^2}, \quad l = a. \quad (10)$$

Мінімально необхідні геометричні характеристики поперечного перерізу з умов стійкості, з врахуванням приєднаного пояску обшивки визначиться з умови

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &\leq \sigma_{кр}; \\ \sigma_{кр} &= \text{th} \left(1,1 \frac{\sigma_e}{\sigma_s} \right) \sigma_s, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де f , i – відповідно площа та момент інерції складеного перерізу профілю з приєднаним пояском обшивки; σ_e визначається за (10).

Нижче наведено необхідні формули геометричних характеристик складеного профілю: ізольований профіль + приєднаний поясок обшивки, які будуть використані для підбору необхідних профілів з умов міцності і стійкості.

Головний центральний момент інерції i , см^4 , складеного перерізу катаного профілю з приєднаним пояском обшивки визначається залежністю

$$i = i_{\text{пр}} + c \cdot t \cdot \left(\frac{t^2}{12} + \left(y_0 + \frac{t}{2} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{c \cdot t}{f_{\text{пр}} + c \cdot t} \right) \right), \quad (12)$$

де $i_{\text{пр}}$ – головний центральний момент інерції профілю з сортаменту, см^4 , який згідно сортаменту ГОСТ 21937 – 76 має позначення I_x ; c – ширина приєданого пояску, см ; t – товщина приєданого пояску, см ; y_0 – відстань від початку стінки до центру мас поперечного перерізу профілю, см (див. позначення сортаменту); $f_{\text{пр}}$ – площа поперечного перерізу ізолюваного профілю, см^2 .

Мінімальний момент опору W_{min} , см^3 , складеного перерізу катаного профілю з приєднаним пояском обшивки визначається залежністю

$$W_{\text{min}} = \frac{c \cdot t^3 \cdot (c \cdot t + 4f_{\text{пр}}) + 12 \{ c \cdot t \cdot [f_{\text{пр}} \cdot y_0 (t + y_0) + i_{\text{пр}}] + f_{\text{пр}} \cdot i_{\text{пр}} \}}{6 \{ c \cdot t \cdot (t + 2h_{\text{пр}}) + 2f_{\text{пр}} (h_{\text{пр}} - y_0) \}}. \quad (13)$$

Площа складеного перерізу f , см^2 , профілю з приєднаним пояском обшивки визначається залежністю

$$f = c \cdot t + f_{\text{пр}}. \quad (14)$$

Момент опору W_{min} підбраного складеного профілю за (13) з наявного сортаменту (з врахуванням приєданого пояску) повинен бути мінімально більшим (або рівним) за визначений момент опору $W_{\phi \text{ min}}$ за (9), тобто повинна виконуватися умова: $W_{\phi \text{ min}} \leq W_{\text{min}}$.

Критичні напруження $\sigma_{\text{кр}}$ балки з підбраним складеним профілем за (10) з наявного сортаменту (з врахуванням приєданого пояску) повинні бути мінімально більшими за стискуючі напруження σ_c , тобто повинна виконуватися умова (11): $\sigma_c \leq \sigma_{\text{кр}}$.

Послідовність визначення необхідного профілю для поздовжніх балок з умов міцності представлено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Алгоритм визначення необхідного профілю з умов міцності

№	Пояснення	Формула	Значення
1	Допустимі напруження матеріалу балки (сталі) з умов міцності, Па	$[\sigma]$	$160 \cdot 10^6$
2	Тиск, Па	p	43000
3	Ширина приєднаного пояску, м	$c = \min\left(\frac{a}{6}; b\right)$	–
4	Товщина приєднаного пояску, м	t	–
5	Згинальний момент в небезп. перерізі, Н	$M = \frac{c \cdot p \cdot a^2}{12}$	–
6	Мінімально необхідний момент опору складеного перерізу профілю з приєднаним пояском з умов міцності, м ³	$W_{\phi \min} \geq \frac{M}{[\sigma]}$	–
7	Підібраний профіль з умов міцності: полособульб несиметричний за ГОСТ 21937 – 76	за (13) з умови $W_{\phi \min} \leq W_{\min}$	–
8	Підібраний профіль: полособульб симетричний за ГОСТ 9235-76	за (13) з умови $W_{\phi \min} \leq W_{\min}$	–
9	Підібраний профіль: тавр зварний за РД 5.9373 – 80	за (13) з умови $W_{\phi \min} \leq W_{\min}$	–
10	Підібраний профіль: полоса табл. 4.1, рядок №4	табл. 4.5	–

Профілі в табл. 4.4 підбираються з врахуванням приєднаного пояску обшивки. Підібраний профіль у вигляді полоси в п.11 табл. 4.4 визначається наступним чином. Мінімальний момент опору W_{\min} перерізу профілю з приєднаним пояском (рис. 4.4) повинен бути не меншим за $W_{\phi \min}$ (п.7, табл. 4.4).

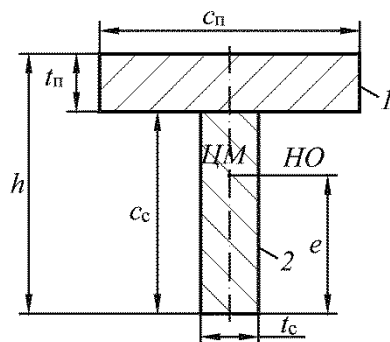


Рис. 4.4 – Профіль з полоєю: 1 – приєднаний поясок; 2 – полоса, розміри якої підбираються

Мінімальний момент опору W_{\min} для перерізу на рис. 4.4 визначається залежністю (13), де власне профілем служить полоса (стінка) 2 рис. 4.4. В цьому випадку у формулі (13):

$$\left. \begin{aligned} c = c_n; \quad t = t_n; \quad y_0 = \frac{c_c}{2}; \\ f_{np} = t_c \cdot c_c; \quad h_{np} = c_c; \quad i_{np} = \frac{c_c^3 \cdot t_c}{12}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

При згині балки з профілем на рис. 4.4 полоса (стінка) 2 може втратити стійкість як пластина. При чому розподіл стискуючих напружень від місцевого згину σ_a є нерівномірним (рис. 4.5). До цих напружень необхідно додати можливі стискуючі напруження σ_b від загального згину корпусу судна на тихій воді або на хвилюванні, коли судно зазнає перегину.

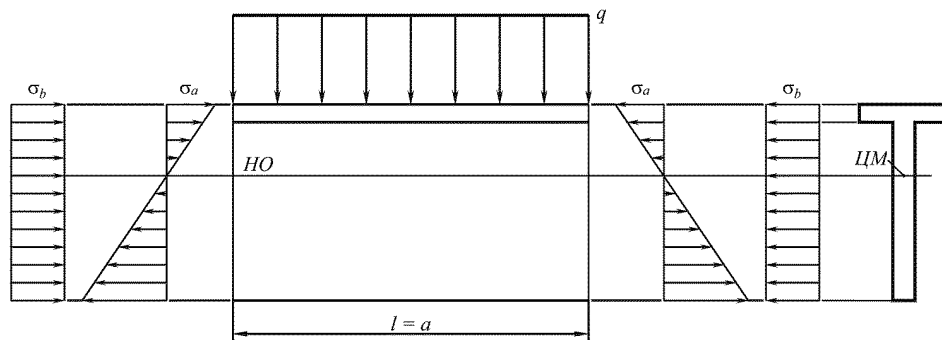


Рис. 4.5 – Стискуючі навантаження на стінку профілю рис. 4.4

Для отримання надійних результатів товщину стінки 2 профілю на рис. 4.4 необхідно визначати за формулою табл. 4.2 для схеми №2.

Необхідна висота стінки c_c полоси (стінки) 2 (рис. 4.4) визначиться шляхом вирішення нелінійного рівняння

$$W_{\min} = W_{\phi \min}, \quad (16)$$

де W_{\min} визначається за (13), а $W_{\phi \min}$ (п.7, табл. 4.4).

На основі залежності табл. 4.2 для схеми №2 згідно позначень рис. 4.4 мінімально необхідна товщина полоси визначається залежністю

$$t_c = 3,4503 \cdot 10^{-3} \cdot c_c \sqrt{\sigma_e}. \quad (17)$$

Підставляючи (17) у формули (15), а потім отримані вирази в (13) і далі отриманий результат в (16), отримуємо нелінійне рівняння, яке вирішуємо відносно невідомої c_c . Обчисливши c_c обчислюємо t_c за (17). Якщо знову розрахувати W_{\min} за (13) з вже відомими точними c_c і t_c , то точно отримаємо значення $W_{\phi \min}$.

Послідовність визначення необхідних розмірів полоси (стінки) 2 (рис. 4.4) з умов стійкості наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Алгоритм визначення розмірів полоси (стінки) 2 (рис. 4.4) з умов стійкості при розрахунку міцності поздовжньої балки

№	Пояснення	Формула	Значення
1	Границя плинності	σ_s	235
2	Стискуючі напруження, МПа	$\sigma_c = \sigma_{кр} = 0,95 \cdot \sigma_s$	223,25
3	Ширина приєднаного пояску, м	c	–
4	Товщина приєднаного пояску, м	t	–
5	Мінімально необхідний момент опору складеного перерізу профілю з приєднаним пояском з умов міцності, м ³	$W_{\phi \min}$ (п.7, табл. 4.4).	–
6	Ейлерові напруження σ_e , МПа, за відомими критичними	$\sigma_e = \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_s} + 2 \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_s} \right)^{10} \right) \sigma_s$	–
7	Висота полоси (стінки) 2 (рис. 4.4), м	c_c з нелінійного рівняння $W_{\min} = W_{\phi \min}$, де W_{\min} визначається за (13)	–
8	Товщина полоси (стінки) 2 (рис. 4.4), м	$t_c = 3,4503 \cdot 10^{-3} \cdot c_c \sqrt{\sigma_e}$	–
9	Округлена товщина полоси (стінки) 2 (рис. 4.4), м	округлюється через 0,5мм при товщині листа від 4мм до 20мм і через 1мм для листів більше 20мм	–
10	Відстань від основи до ЦМ ізолюваного профілю, м	$y_0 = \frac{c_c}{2}$	–
11	Площа поперечного перерізу ізолюваного профілю, м ²	$f_{пр} = t_c \cdot c_c$	–
12	Висота ізолюваного профілю, м	$h_{пр} = c_c$	–
13	Власний момент інерції ізолюваного профілю, м ⁴	$i_{пр} = \frac{c_c^3 \cdot t_c}{12}$	–
14	Головний центральний момент інерції профілю з приєднаним пояском, м ⁴	за (12)	–
15	Мінімальний момент опору профілю з приєднаним пояском, м ³	за (13)	–
16	Площа поперечного перерізу з приєднаним пояском, м ²	за (14)	–

Знову обчислені критичні напруження для пластини табл. 4.2, схема 2 за відомими точними c_c і t_c (рис. 4.4) точно дорівнюють стискаючим напруженням,

що свідчить про вірність алгоритму табл. 4.5. Товщина t_c після розрахунків округлюється в більшу сторону згідно стандарту.

Послідовність визначення необхідного профілю для поздовжніх балок з умов стійкості представлено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Алгоритм визначення необхідного профілю з умов стійкості

№	Пояснення	Формула	Значення
1	Границя плинності	σ_s	235
2	Стискуючі напруження, МПа	$\sigma_c = 0,95 \cdot \sigma_s$	223,25
3	Ширина приєднаного пояску, м	$c = \min\left(\frac{a}{6}; b\right)$	–
4	Товщина приєднаного пояску, м	t	–
5	Ейлерові напруження балки складеного перерізу профілю з приєднаним пояском, Па	$\sigma_e = \frac{\pi^2 E \cdot i}{f \cdot a^2}$	–
6	Відповідні критичні напруження, Па	$\sigma_{кр} = \text{th}\left(1,1 \frac{\sigma_e}{\sigma_s}\right) \sigma_s$	–
7	Прийнятий профіль: полособульб несиметричний за ГОСТ 21937 – 76	з умови $\sigma_c \leq \sigma_{кр}$	–
8	Прийнятий профіль: полособульб симетричний за ГОСТ 9235-76	з умови $\sigma_c \leq \sigma_{кр}$	–
9	Прийнятий профіль: тавр зварний за РД 5.9373 – 80	з умови $\sigma_c \leq \sigma_{кр}$	–
10	Прийнятий профіль: полоса табл. 4.1, рядок №4	табл. 4.7	–

Прийнятий профіль у вигляді полоси в п.10 табл. 4.6 визначається наступним чином. Критичні напруження $\sigma_{кр}$ балки зі складеним перерізом профілю з приєднаним пояском повинні бути мінімально більшими за стискуючі напруження σ_c . При втраті стійкості балкою з профілем на рис. 4.4 можлива втрата стійкості половою (стілкою) 2 (рис. 4.4), якщо розглядати останню в якості пластини з вільною кромкою. Далі пояснення аналогічні тим, які мали місце при поясненні втрати стійкості полоси (стілки) 2 (рис. 4.4) при розрахунку міцності.

Необхідна висота стінки c_c полоси (стілки) 2 (рис. 4.4) визначиться шляхом вирішення нелінійного рівняння

$$\sigma_c = \sigma_{кр}, \quad (18)$$

де $\sigma_{кр} = \text{th} \left(1,1 \frac{\sigma_e}{\sigma_s} \right) \sigma_s$ за (3); $\sigma_e = \frac{\pi^2 E \cdot i}{f \cdot a^2}$ за (10); i визначається за (12); f – за (14);

Підставляючи (17) у формули (15), а потім отримані вирази в (12) і далі отриманий результат у (18), отримуємо нелінійне рівняння, яке вирішуємо відносно невідомої c_c . Обчисливши c_c обчислюємо t_c за (17). Якщо знову розрахувати i за (12) і f за (14) з вже відомими точними c_c і t_c , то точно отримаємо виконання умови (18).

Послідовність визначення необхідних розмірів полоси (стінки) 2 (рис. 4.4) з умов стійкості наведено в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Алгоритм визначення розмірів полоси (стінки) 2 (рис. 4.4) з умов стійкості при розрахунку стійкості поздовжньої балки





№	Пояснення	Формула	Значення
1	Границя плинності	σ_s	235
2	Стискуючі напруження, МПа	$\sigma_c = \sigma_{кр} = 0,95 \cdot \sigma_s$	223,25
3	Ширина приєднаного пояску, м	c	–
4	Товщина приєднаного пояску, м	t	–
5	Ейлерові напруження σ_{eb} , МПа, балки складеного профілю, Па	$\sigma_{eb} = \frac{\pi^2 E \cdot i}{f \cdot a^2}$	–
6	Ейлерові напруження σ_e , МПа, за відомими критичними	$\sigma_e = \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_s} + 2 \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_s} \right)^{10} \right) \sigma_s$	–
7	Висота полоси (стінки) 2 (рис. 4.4), м	c_c з нелінійного рівняння $\sigma_c = \text{th} \left(1,1 \frac{\sigma_{eb}}{\sigma_s} \right) \sigma_s$, де i та f визначаються відповідно за (12), (14)	–
8	Товщина полоси (стінки) 2 (рис. 4.4), м	$t_c = 3,4503 \cdot 10^{-3} \cdot c_c \sqrt{\sigma_e}$	–
9	Округлена товщина полоси (стінки) 2 (рис. 4.4), м	округлюється через 0,5мм при товщині листа від 4мм до 20мм і через 1мм для листів більше 20мм	–
10	Відстань від основи до ЦМ ізолюваного профілю, м	$y_0 = \frac{c_c}{2}$	–
11	Площа поперечного перерізу ізолюваного профілю, м ²	$f_{пр} = t_c \cdot c_c$	–
12	Висота ізолюваного профілю, м	$h_{пр} = c_c$	–
13	Власний момент інерції ізолюваного профілю, м ⁴	$i_{пр} = \frac{c_c^3 \cdot t_c}{12}$	–

№	Пояснення	Формула	Значення
14	Головний центральний момент інерції профілю з приєднаним пояском, м ⁴	за (12)	–
15	Мінімальний момент опору профіля з приєднаним пояском, м ³	за (13)	–
16	Площа поперечного перерізу з приєднаним пояском, м ²	за (14)	–

Знову обчислені критичні напруження для пластини табл. 4.2, схема 2 за відомими точними c_c і t_c (рис. 4.4) точно дорівнюють стискаючим напруженням, що свідчить про вірність алгоритму табл. 4.7. Товщина t_c після розрахунків округлюється в більшу сторону згідно стандарту.

Після підбору поперечних перерізів поздовжніх РЖ з умов міцності і стійкості окремо для кожного з поперечних перерізів табл. 4.1 результати розрахунків заносимо до накопичувальної таблиці, яка може бути представлена, наприклад, у формі табл. 4.8. В цій же таблиці приймаємо остаточний профіль поздовжніх балок для фіксованих n_6 і n_{II} за найбільшою площею профілю. Остаточні підібрані профілі поздовжніх балок надалі будуть задіяні при розрахунках стійкості перекриття, а також для розрахунку маси виготовлення перекриття.

Таблиця 4.8 – Параметри поперечних перерізів балок перекриття при фіксованих n_6 і n_{II}

Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = \text{см}^3$; Стискаючі напруження $\sigma_c = 223,25 \text{ МПа}$.									
Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{см}^2$	$i, \text{см}^4$	$W_{\min}, \text{см}^4$	$c, \text{см}$	$t, \text{см}$	$f_{\text{пр}}, \text{см}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОСТ 21937–76									міцності
									стійкості
									прийнято
ГОСТ 9235 –76									міцності
									стійкості
									прийнято
РД 5.9373 – 80									міцності
									стійкості
									прийнято
–									міцності
									стійкості
									прийнято

В табл. 4.8 параметри з умови міцності розраховуються згідно табл. 4.4, а параметри з умови стійкості – згідно табл. 4.6. Прийнятий профіль приймається за більшими геометричними характеристиками. В табл. 4.8 введено наступні позначення: f – площа складеного перерізу; W_{\min} – мінімальний момент опору складеного перерізу; i – момент інерції складеного перерізу; $f_{\text{пр}}$ – площа ізольованого профілю, яка буде використовуватися для підрахунку маси.

Положення для розрахунку бiмсiв з умов мiцностi. Підбір профілю бiмсiв відбувається за табл. 4.4, але з декількома зауваженнями: 1) не розглядається поперечний переріз схеми №4 табл. 4.1, тому що, як буде показано далі, момент інерції бiмсiв отримується великим за рахунок забезпечення стійкості перекриття, і якщо не використовувати вільний поясок в складі перерізу бiмсу, то товщина стінки буде завеликою, що дасть збільшення металоємності і вже не буде того виграшу, який може бути для аналогічного випадку для поздовжніх РЖ; 2) ширина приєднаного пояску визначається згідно [7], тому що бiмс є рамною в'яззю; 3) довжина рамної балки дорівнює ширині перекриття L .

Положення для розрахунку бiмсiв з умов стiйкостi. Так як стискуючі напруження від загального згину корпусу судна прийняті практично рівними границі плинності, то відразу буде доцільним розрахувати його критичний момент інерції [8, 9], аніж підбирати момент інерції бiмсу при дії вказаного стискуючого навантаження. Критичний момент інерції бiмсiв $I_{b_{кр}}$ визначається згідно послідовності, представленої в табл. 4.9.



Таблиця 4.9 – Алгоритм розрахунку критичного моменту інерції бiмсiв

№ п/п	Найменування розрахункових величин	Розрахункові формули	Значення
1	Відстань між поздовжніми балками, м	b	
2	Відстань між бiмсами, м	a	
3	Ширина перекриття, м	L	
4	Модуль пружності при розтягу для сталі, Па	E	$2 \cdot 10^{11}$
5	Момент інерції одного поздовжнього РЖ, м ⁴	I	
6	Площа поперечного перерізу одного поздовжнього РЖ, м ²	F	
7	Гнучкість поздовжніх стержнів	λ	1,0

№ п/п	Найменування розрахункових величин	Розрахункові формули	Значення
8	Границя плинності, Па	σ_s	
9	Ейлерові напруження, МПа, для поздовжніх РЖ при $\lambda = 1,0$.	$\sigma_{0э} = \frac{\pi^2 EI}{Fa^2}$	
10	Ейлерові напруження, Па, для поздовжніх РЖ	$\sigma_э = \lambda \sigma_{0э}$	
11	Критичні напруження, Па	$\sigma_{кр} = \text{th} \left(1,1 \frac{\sigma_e}{\sigma_s} \right) \sigma_s$	
12	Коефіцієнт, який враховує відхилення від закону Гука при втраті стійкості поздовжніми РЖ	$\varphi = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma_e}$	
13	Коефіцієнт опорної пари з однієї сторони	κ_1	1,0
14	Коефіцієнт опорної пари з іншої сторони	κ_2	1,0
15	Коефіцієнт за табл. 20.2 [9]	$\left(\frac{\pi}{\mu_1} \right)^4$	0,195
16	Кількість бімсів	n_6	
17	Функція за табл. 20.1 [9]	$\chi_{j \max}(\lambda)$	
18	Критичний головний центральний момент інерції бімсів, м ⁴	$I_{\sigma_{кр}} = \left(\frac{\pi}{\mu_1} \right)^4 \left(\frac{L}{a} \right)^3 \left(\frac{L}{b} \right) \varphi I \chi_{j \max}(\lambda)$	
19	Підібраний профіль: полособульб несиметричний за ГОСТ 21937 – 76	за (12) з умови $I_{\sigma_{кр}} \leq i$	
20	Підібраний профіль: полособульб симетричний за ГОСТ 9235-76	за (12) з умови $I_{\sigma_{кр}} \leq i$	
21	Підібраний профіль: тавр зварний за РД 5.9373 – 80	за (12) з умови $I_{\sigma_{кр}} \leq i$	

Для кожного перерізу поздовжніх РЖ з табл. 4.8 підбираються три профілі (див. останні пункти табл. 4.9). Геометричні характеристики поздовжніх РЖ беруться з табл. 4.8, умова «прийнято» для кожного зі стандартів. Результати розрахунків критичних моментів інерції бімсів записуються у форму табл. 4.10, де пояснення такі ж самі як для табл. 4.8.

Таблиця 4.10 – Профілі бiмсiв з умов стiйкостi

Параметри поздовжнiх балок		Параметри бiмсiв							
Стандарт	Ескiз	Стандарт	№ профiлю	$f, \text{см}^2$	$i, \text{см}^4$	$W_{\min}, \text{см}^4$	$c, \text{см}$	$t, \text{см}$	$f_{\text{пр}}, \text{см}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОСТ 21937–76		Критичний момент iнерцiї бiмсiв $I_{\delta_{кр}} = \text{см}^4$							
		ГОСТ 21937–76							
		ГОСТ 9235 –76							
		РД 5.9373 – 80							
ГОСТ 9235 –76		Критичний момент iнерцiї бiмсiв $I_{\delta_{кр}} = \text{см}^4$							
		ГОСТ 21937–76							
		ГОСТ 9235 –76							
		РД 5.9373 – 80							
РД 5.9373 – 80		Критичний момент iнерцiї бiмсiв $I_{\delta_{кр}} = \text{см}^4$							
		ГОСТ 21937–76							
		ГОСТ 9235 –76							
		РД 5.9373 – 80							
–		Критичний момент iнерцiї бiмсiв $I_{\delta_{кр}} = \text{см}^4$							
		ГОСТ 21937–76							
		ГОСТ 9235 –76							
		РД 5.9373 – 80							

Для кожного зi стандартiв приймаємо остаточний профiль бiмсу з умов мiцностi i стiйкостi за найбільшою площею профiлю, з масиву даних табл. 4.8, 4.10.

4.2 Параметри серiйних розрахункiв

Для проведення серiйних розрахункiв довжина перекриття приймається $l = 12,0 \text{ м} =$ довжинi вiдсiку; ширина перекриття становить $L = 14,0 \text{ м} =$ вiдстанi мiж внутрiшнiми бортами, тобто $16,1 - 2 \cdot 1,045 = 14,01 \text{ м}$. Для забезпечення точностi розрахункiв приймаємо рiвномiрну вiддаленiсть поздовжнiх балок i бiмсiв один вiд одного. Це призведе до того, що вiдстанi b (рис. 4.1) можуть не вiдповiдати стандартним розмiрам шпаций, а розмiри a можуть не бути кратнi стандартним розмiрам шпаций. Проте в такому випадку можна точно розрахувати мiцнiсть i стiйкiсть в рамках представлених математичних моделях i точно порахувати масу. Отримавши оптимальнi значення n_{δ} i $n_{\text{п}}$, при яких забезпечується мiнiмальна маса перекриття можна потiм прийняти варiант перекриття, у якого b буде округлене в меншу сторону до найближчого стандартного розмiру шпациї.

Серійні розрахунки були проведені для наступних значень кількості бімсів n_6 і кількості поздовжніх РЖ n_n , які, які представлені в табл. 4.11. Кількість n_6 і n_n прийнята таким чином, щоб відстань між поздовжніми РЖ була близька до стандартних розмірів шпаций, а систем набору перекриття щоб завжди була поздовжньою, тобто відношення $a/b \geq 1$.

Таблиця 4.11 – Вихідні параметри для серійних розрахунків

Кількість бімсів n_6	3	5	7	–
Розмір пластини $a = \frac{l}{n_6 + 1}$, м	3	2	1,5	–
Кількість поздовжніх РЖ n_n	34	25	19	13
Розмір пластини $b = \frac{L}{n_n + 1}$, м	0,4	0,538	0,7	1

Як видно з табл. 4.11 відношення $a/b \geq 1$ для всіх значень прийнятого масиву вихідних даних, які будуть опрацьовуватися в рамках серійних розрахунків.

Маса перекриття m розраховується за формулою

$$m = \rho \cdot (t \cdot l \cdot L + n_n \cdot f_{np}^n \cdot l + n_6 \cdot f_{np}^6 \cdot L), \quad (19)$$

де t – товщина настилу; L, l – розміри перекриття (рис. 4.1); n_6 і n_n – відповідно кількість бімсів і кількість поздовжніх РЖ; f_{np}^n – площа ізолюваного профілю однієї поздовжньої балки; f_{np}^6 – площа ізолюваного профілю одного бінса.

Значення f_{np}^n, f_{np}^6 беруться з 9-ї колонки, умови «прийнято», табл. 4.8.

Маса перекриття при фіксованих n_6 і n_n розраховується для кожного з прийнятих профілів згідно стандарту поокремо і заноситься в табл. типу 4.12.

Таблиця 4.12 – Форма для запису значень маси перекриття для фіксованих n_6 і n_n

		Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76	ГОСТ 9235 –76	РД 5.9373 – 80	полоса
Стандарти для бімсів	ГОСТ 21937–76				
	ГОСТ 9235 –76				
	РД 5.9373 –80				

4.3 Аналіз профілів поздовжніх балок ВП з фіксованим числом поздовжніх балок і бімсів

Проведемо вартісно-економічний аналіз з врахуванням технологічних факторів для профілів поздовжніх балок, який допоможе у прийнятті рішення щодо остаточного вибору профілю згідно обраного сортаменту.

Розглянемо реалістичний варіант перекриття з числом поздовжніх РЖ $n_{\Pi} = 19$ і числом бімсів $n_{\sigma} = 5$, що відповідає розмірам пластини $a = 2$ м, $b = 0,7$ м. Розрахунок товщини настилу з умов міцності і стійкості з округленням до стандартного, виконаного згідно алгоритму табл. 4.3 представлено в табл. 4.13.





Таблиця 4.13 – Розрахунок товщини пластини настилу ВП при $n_{\Pi} = 19$ і $n_{\sigma} = 5$

№	Пояснення	Формула	Значення
1	Границя плинності	σ_s	235
2	Допустимі напруження матеріалу пластини (сталі) з умов міцності, МПа	$[\sigma]$	160
3	Тиск на поле пластини, Па	p	43000
4	Стискуючі напруження, МПа	$\sigma_c = \sigma_{kp} = 0,95 \cdot \sigma_s$	223,25
5	Коротка сторона пластини, м	b	0,7
6	Довга сторона пластини, м	a	2
7	Відношення	$\gamma = a/b$	2,857143
8	Коефіцієнт	ν_{22} за табл. 19.3 [5]	0,083157
9	Мінімально необхідна товщина $t_{\min 1}$, мм, пластини з умов міцності	$t_{\min 1} = \sqrt{\frac{6 \cdot \nu_{22} p b^2}{[\sigma]}}$	8,105834
10	Ейлерові напруження σ_e , МПа, за відомими критичними	$\sigma_e = \left(\frac{\sigma_{kp}}{\sigma_s} + 2 \left(\frac{\sigma_{kp}}{\sigma_s} \right)^{10} \right) \sigma_s$	504,6564
11	Мінімально необхідна товщина $t_{\min 2}$, мм, пластини з умов стійкості	$t_{\min 2} = 1,118 \cdot 10^{-3} \cdot b \sqrt{\sigma_e}$	17,58076
12	Найбільша товщина t , мм	$t = \max(t_{\min 1}, t_{\min 2})$	17,58076
13	Прийнята товщина, мм	округлюється через 0,5мм при товщині листа від 4мм до 20мм і через 1мм для листів більше 20мм	18


Результати розрахунку поздовжніх РЖ з умов міцності і стійкості представлено в табл. 4.14. Результати розрахунку бімсів з умов міцності

представлено в табл. 4.15, а з умов стійкості в 4.16, де параметри поздовжніх балок були прийняті з табл. 4.14 з умови прийнято. В табл. 4.17 представлено прийняті профілі бімсів для кожного зі стандартів. Якщо за стандартом неможливо було визначити профіль, то він до уваги не приймався і не відображався в табл. 4.17.


Таблиця 4.14 – Параметри поздовжніх балок при фіксованих $n_{\pi} = 19$ і $n_{\sigma} = 5$




Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 29,861111 \text{ см}^3$; Стискуючі напруження $\sigma_c = 223,25 \text{ МПа}$.									
Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОСТ 21937–76		9	67,03	341,77	37,10	33,33	1,8	7,03	міцності
		12	71,13	843,92	72,89	33,33	1,8	11,13	стійкості
		12	71,13	843,92	72,89	33,33	1,8	11,13	прийнято
ГОСТ 9235–76		935	66,82	351,24	38,14	33,33	1,8	6,82	міцності
		1235	70,15	833,73	71,70	33,33	1,8	10,15	стійкості
		1235	70,15	833,73	71,70	33,33	1,8	10,15	прийнято
РД 5.9373 – 80		14	70,40	1371,34	99,12	33,33	1,8	10,40	міцності
		14	70,40	1371,34	99,12	33,33	1,8	10,40	стійкості
		14	70,40	1371,34	99,12	33,33	1,8	10,40	прийнято
полоса		(8.*98)	67,86	314,09	31,25	33,33	1,8	7,86	міцності
		(9.5*1.2e+002)	71,19	580,47	49,99	33,33	1,8	11,19	стійкості
		(9.5*1.2e+002)	71,19	580,47	49,99	33,33	1,8	11,19	прийнято

Таблиця 4.15 – Параметри бімсів при фіксованих $n_{\pi} = 19$ і $n_{\sigma} = 5$ з умов міцності

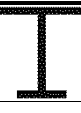
Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 3336,083333 \text{ см}^3$;									
Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РД 5.9373 – 80		56a	260,2	145334	3633,755	76	1,8	123,4	міцності

Таблиця 4.16 – Параметри бімсів при фіксованих $n_{\pi} = 19$ і $n_{\sigma} = 5$ з умов стійкості

Параметри поздовжніх балок		Параметри бімсів							
Стандарт	Ескіз	Стандарт	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОСТ 21937–76		$I_{\phi \text{кр}} = 169918,31 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	63a	285	214604,2	5084,346	76	1,8	148,2

Параметри поздовжніх балок		Параметри бiмciv							
Стандарт	Ескiз	Стандарт	№ профiлю	f, cm^2	i, cm^4	W_{\min}, cm^4	c, cm	t, cm	$f_{\text{пр}}, \text{cm}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОСТ 9235 –76		$I_{\text{бкр}} = 167590,4 \text{ cm}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	63а	285	214604,2	5084,346	76	1,8	148,2
РД 5.9373 – 80		$I_{\text{бкр}} = 169539,2 \text{ cm}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	63а	285	214604,2	5084,346	76	1,8	148,2
–		$I_{\text{бкр}} = 163734,7 \text{ cm}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	63а	285	214604,2	5084,346	76	1,8	148,2

Таблиця 4.17 – Параметри прийнятих бiмciv при фiксованих $n_{\text{п}} = 19$ i $n_{\text{б}} = 5$ з умов мiцностi i стiйкостi

Стандарт	Ескiз	№ профiлю	f, cm^2	i, cm^4	W_{\min}, cm^4	c, cm	t, cm	$f_{\text{пр}}, \text{cm}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РД 5.9373 – 80		63а	285	214604,2	5084,346	76	1,8	148,2	прийнято

Для прийнятих профiлiв з табл. 4.14 та табл. 4.17 були проведенi розрахунки маси перекриття, вiдповiднi результати яких занесенi в табл. 4.18.

Таблиця 4.18 – Маси перекриття, кг, для фiксованих $n_{\text{п}} = 19$ i $n_{\text{б}} = 5$

		Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №12	ГОСТ 9235–76, №1235	РД 5.9373–80, №14	полоса, 9,5×120
Стандарти для бiмciv	ГОСТ 21937–76	–	–	–	–
	ГОСТ 9235–76	–	–	–	–
	РД 5.9373 – 80, №63а	33874,04	33698,64	33743,38	33884,97

Розкладемо масу розраховану в табл. 4.18 за складовими. Абсолютнi показники цих складових показано в табл. 4.19, а вiдноснi – в табл. 4.20.

Таблиця 4.19 – Абсолютні складові, кг, маси перекриття з табл. 4.18

№	Складова	Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №12	ГОСТ 9235–76, №1235	РД 5.9373–80, №14	полоса, 9,5×120
1	Настил	23738	23738	23738	23738
2	Поздовжні РЖ	1992	1817	1861	2003
3	Бімси	8144	8144	8144	8144

Таблиця 4.20 – Відносні складові, %, маси перекриття з табл. 4.18

№	Складова	Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №12	ГОСТ 9235–76, №1235	РД 5.9373–80, №14	полоса, 9,5×120
1	Настил	70,08	70,44	70,35	70,06
2	Поздовжні РЖ	5,88	5,39	5,52	5,91
3	Бімси	24,04	24,17	24,13	24,03
4	Σ	100,0	100,0	100,0	100,0

Як видно з табл. 4.19, і табл. 4.20 основну масу перекриття становить настил, частка якого становить близько 70% від всієї маси перекриття. А тому заходи по зменшенню товщини перекриття були б доцільними. Як бачимо з табл. 4.13 товщина з умов міцності становить трохи більше 8 мм, а з умов стійкості 18 мм. Тому необхідні заходи щодо зменшення товщини з умов стійкості. З формули п.11, табл. 4.13 видно, що досягти зменшення товщини можливо зменшуючи відстань між поздовжніми регулярними РЖ, та/або зменшуючи значення стискуючих напружень. При розрахунку стійкості як настилу, так і перекриття в стержневій ідеалізації стискуючі напруження приймалися практично рівними напруженням границі плинності від дії граничного згинального моменту. Такий рівень стискуючих напружень звичайно забезпечує надійні результати товщини настилу, проте збільшує загальну металоємність перекриття. Значення дійсних стискуючих напружень від загального згину залежать від сумарного згинального моменту і є меншими за напруження границі плинності від граничного моменту. Проте необхідний акуратний розрахунок цих напружень, щоб не отримати недооцінку стійкості.

Що стосується застосування поздовжніх балок набору, то найменша маса перекриття отримується при застосуванні профілю за ГОСТ 9235–76.

Як видно з табл. 4.20 маса поздовжніх профілів не перебільшує 6% від загальної маси перекриття, а тому мінімізація їхньої маси у складі перекриття практично неактуальна. В цьому випадку необхідно приймати найдешевший профіль поздовжніх РЖ.

Для проведення точного вартісного аналізу профілі з табл. 4.20 повинні бути вироблені зі сталі, характеристики якої близькі до сталі Ст3, або в крайньому випадку виконані з однієї і тієї ж сталі, щоб в цьому випадку мати можливість провести порівняльний аналіз.

Для проведення вартісного аналізу в рамках певного виробництва з метою прийняття потрібного профілю поздовжніх РЖ може бути рекомендована нижче представлена послідовність розрахунку, де задіяна операція обробки кромки, якими поздовжні РЖ безпосередньо примикають до настилу ВП. Операція розділки кромки застосовується для всіх типів поздовжніх РЖ: для катаних, зварних і полоси. Включення цієї операції до вартості пояснюється наступним. При виробництві складених зварних профілів, таких як таврових відразу після відрізу полоси на потрібних кромках виконують їх розділку. Тому що на готовому виробі виконувати розділку кромки важче і це підвищує загальну трудомісткість виготовлення секції. Таким чином забезпечуються рівні умови для порівняння вартості.

Для прокатних профілів за ГОСТ 21937–76 та ГОСТ 9235–76 вартість V розраховується за формулою

$$V = p_{m1т} \cdot m_n + n_n \cdot l \cdot p_{кр1м}, \quad (20)$$

де $p_{m1т}$ – вартість однієї тони профільного прокату, грн/тонна; m_n – маса поздовжніх балок прокатного профілю, т, які задіяні у складі перекриття (береться з табл. 4.19); $p_{кр1м}$ – вартість розділки кромки 1 метру погонного, грн./м.

Полосу (табл. 4.20) планується відрізати від листового металу в загальному випадку, а потім по цій (одній) лінії відрізу робити розділку кромки. Виробництво

полос починається з краю листа, а тому різ один. Вартість полоси з табл. 4.20 розраховується за формулою

$$V = p_{m1T} \cdot m_n + n_n \cdot l \cdot (p_{pi1M} + p_{kp1M}), \quad (21)$$

де p_{m1T} – вартість однієї тони листового прокату визначеної товщини, грн/тонна; p_{pi1M} – вартість різі кромки 1 метру погонного, грн./м.

У випадку, якщо в наявності є полоса визначної товщини і ширини, то складова різі дорівнює нулю (розділка кромки залишається), тобто $p_{pi1M} = 0$. Для полоси як правило характерна збільшена товщина у порівнянні з іншими профілями.

При розрахунку вартості виготовлення зварного тавру за РД 5.9373–80 вважається, що полка і стінка відрізаються від листового матеріалу, кромки стінки з обох боків розділюються, а потім стінка вздовж з обох боків приварюється симетрично до полки. Є варіанти, коли для стінки і/або полки може бути застосована стандартна полоса, або комбіноване поєднання стандартної полоси і відрізаної полоси від листа металу. Для вказаного випадку потрібно знати конкретні умови певного виробництва і постачання. Вказані поєднання є задачею окремого дослідження, яка тут не розглядається.

Таким чином вартість виготовлення таврового профілю за РД 5.9373–80 визначається залежністю

$$V = p_{m1T} \cdot m_n + n_n \cdot l \cdot (2p_{pi1M} + 2p_{kp1M} + 2p_{зв1M}), \quad (22)$$

де окрім вищезазначених пояснень $p_{зв1M}$ – вартість зварювання 1 метру погонного, грн./м; p_{kp1M} – вартість розділки кромки 1 метру погонного, грн./м.

Необхідно зазначити, що тавр №14 за РД 5.9373–80 не потребує обробки кромки стінок, тому що товщина стінки становить 4 мм. При визначенні вартості саме для тавра №14 за РД 5.9373–80 складову обробки кромки p_{kp1M} необхідно покласти рівною нулю. Якщо планується зварювання напівавтоматом, то операцію обробки кромки для поздовжніх РЖ необхідно виключити, тобто у формулах (20), (21), (22) складову вартості цієї операції покласти рівною нулю.

4.4 Аналіз параметрів перекриття при зміні кількості бiмсів для фіксованої кількості поздовжніх РЖ

Прослідкуємо зміну параметрів перекриття при фіксованій кількості поздовжніх РЖ, число яких дорівнює $n_{\text{п}} = 19$, а кількість бiмсів змінюється в рамках масиву $n_{\text{б}} = 3, 5, 7$. Власне варіант при $n_{\text{б}} = 5$ був розрахований вище.

Параметри розрахунків представлені нижче.





Фіксовані кількості $n_{\text{п}} = 19, n_{\text{б}} = 3$.

Розрахунок параметрів перекриття аналогічний тому, який був представлений в § 4.3. Тут представлено лише таблиці з даними.

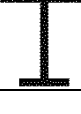
Таблиця 4.21 – Розрахунок товщини пластини настилу ВП при $n_{\text{п}} = 19$ і $n_{\text{б}} = 3$

№	Пояснення	Формула	Значення
1	Границя плинності	σ_s	235
2	Допустимі напруження матеріалу пластини (сталі) з умов міцності, МПа	$[\sigma]$	160
3	Тиск на поле пластини, Па	p	43000
4	Стискуючі напруження, МПа	$\sigma_c = \sigma_{\text{кр}} = 0,95 \cdot \sigma_s$	223,25
5	Коротка сторона пластини, м	b	0,7
6	Довга сторона пластини, м	a	3
7	Відношення	$\gamma = a/b$	4,285714
8	Коефіцієнт	ν_{22} за табл. 19.3 [5]	0,0833
9	Мінімально необхідна товщина t_{min1} , мм, пластини з умов міцності	$t_{\text{min1}} = \sqrt{\frac{6 \cdot \nu_{22} p b^2}{[\sigma]}}$	8,112793
10	Ейлерові напруження σ_e , МПа, за відомими критичними	$\sigma_e = \left(\frac{\sigma_{\text{кр}}}{\sigma_s} + 2 \left(\frac{\sigma_{\text{кр}}}{\sigma_s} \right)^{10} \right) \sigma_s$	504,6564
11	Мінімально необхідна товщина t_{min2} , мм, пластини з умов стійкості	$t_{\text{min2}} = 1,118 \cdot 10^{-3} \cdot b \sqrt{\sigma_e}$	17,58076
12	Найбільша товщина t , мм	$t = \max(t_{\text{min1}}, t_{\text{min2}})$	17,58076
13	Прийнята товщина, мм	округлюється через 0,5мм при товщині листа від 4мм до 20мм і через 1мм для листів більше 20мм	18





Таблиця 4.22 – Параметри поздовжніх балок при фіксованих $n_{\pi} = 19$ і $n_{\sigma} = 3$

Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 100,78 \text{ см}^3$; Стискуючі напруження $\sigma_c = 223,25 \text{ МПа}$.									
Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОСТ 21937–76		14a	104,05	1443,99	106,27	50,00	1,8	14,05	міцності
		16a	107,94	2250,31	149,13	50,00	1,8	17,94	стійкості
		16a	107,94	2250,31	149,13	50,00	1,8	17,94	прийнято
ГОСТ 9235 – 76		1446	103,10	1459,43	107,23	50,00	1,8	13,10	міцності
		1646	106,47	2307,18	152,67	50,00	1,8	16,47	стійкості
		1646	106,47	2307,18	152,67	50,00	1,8	16,47	прийнято
РД 5.9373 – 80		166	106,00	2808,94	178,66	50,00	1,8	16,00	міцності
		166	106,00	2808,94	178,66	50,00	1,8	16,00	стійкості
		166	106,00	2808,94	178,66	50,00	1,8	16,00	прийнято
полоса		(12*1.5e+002)	108,39	1503,10	101,77	50,00	1,8	18,39	міцності
		(13*1.7e+002)	111,62	2002,69	127,20	50,00	1,8	21,62	стійкості
		(13*1.7e+002)	111,62	2002,69	127,20	50,00	1,8	21,62	прийнято


Таблиця 4.23 – Параметри бімсів при фіксованих $n_{\pi} = 19$ і $n_{\sigma} = 3$ з умов міцності

Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 5004,125 \text{ см}^3$;									
Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РД 5.9373 – 80		63a	353,4	245583,2	5248,155	114	1,8	148,2	міцності

Таблиця 4.24 – Параметри бімсів при фіксованих $n_{\pi} = 19$ і $n_{\sigma} = 3$ з умов стійкості

Параметри поздовжніх балок		Параметри бімсів							
Стандарт	Ескіз	Стандарт	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОСТ 21937–76		$I_{\phi \text{кр}} = 154248,7 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	56a	328,6	164301,5	3743,569	114	1,8	123,4
ГОСТ 9235 –76		$I_{\phi \text{кр}} = 152803,3 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	56a	328,6	164301,5	3743,569	114	1,8	123,4
РД 5.9373 – 80		$I_{\phi \text{кр}} = 154382,1 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	56a	328,6	164301,5	3743,569	114	1,8	123,4
–		$I_{\phi \text{кр}} = 155943,6 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	56a	328,6	164301,5	3743,569	114	1,8	123,4

Таблиця 4.25 – Параметри прийнятих бімсів при фіксованих $n_{\text{п}} = 19$ і $n_{\text{б}} = 3$ з умов міцності і стійкості

Стандарт	Ескіз	№ профілю	f , см ²	i , см ⁴	W_{min} , см ⁴	c , см	t , см	$f_{\text{пр}}$, см ²	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РД 5.9373 – 80		63а	353,4	245583,2	5248,155	114	1,8	148,2	прийнято

Таблиця 4.26 – Маса перекриття, кг, для фіксованих $n_{\text{п}} = 19$ і $n_{\text{б}} = 3$

		Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №16а	ГОСТ 9235–76, №1646	РД 5.9373–80, №166	полоса, 13×170
Стандарти для бімсів	ГОСТ 21937–76	–	–	–	–
	ГОСТ 9235–76	–	–	–	–
	РД 5.9373 – 80, №63а	31835	31572	31488	32494

Розкладемо масу розраховану в табл. 4.26 за складовими. Абсолютні показники цих складових показано в табл. 4.27, а відносні – в табл. 4.28.

Таблиця 4.27 – Абсолютні складові, кг, маси перекриття з табл. 4.26

№	Складова	Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №16а	ГОСТ 9235–76, №1646	РД 5.9373–80, №166	полоса, 13×170
1	Настил	23738	23738	23738	23738
2	Поздовжні РЖ	3211	2948	2864	3869
3	Бімси	4886	4886	4886	4886

Таблиця 4.28 – Відносні складові, %, маси перекриття з табл. 4.26

№	Складова	Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №16а	ГОСТ 9235–76, №1646	РД 5.9373–80, №166	полоса, 13×170
1	Настил	74,57	75,19	75,39	73,06
2	Поздовжні РЖ	10,09	9,34	9,09	11,91
3	Бімси	15,35	15,48	15,52	15,04
4	Σ	100,0	100,0	100,0	100,0


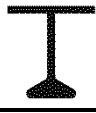
Фіксовані кількості $n_{II} = 19$, $n_{\sigma} = 7$.


Розрахунок параметрів перекриття аналогічний тому, який був представлений в § 4.3. Тут представлено лише таблиці з даними.

Таблиця 4.29 – Розрахунок товщини пластини настилу ВП при $n_{II} = 19$ і $n_{\sigma} = 7$


№	Пояснення	Формула	Значення
1	Границя плинності	σ_s	235
2	Допустимі напруження матеріалу пластини (сталі) з умов міцності, МПа	$[\sigma]$	160
3	Тиск на поле пластини, Па	p	43000
4	Стискуючі напруження, МПа	$\sigma_c = \sigma_{kp} = 0,95 \cdot \sigma_s$	223,25
5	Коротка сторона пластини, м	b	0,7
6	Довга сторона пластини, м	a	1,5
7	Відношення	$\gamma = a/b$	2,142857
8	Коефіцієнт	v_{22} за табл. 19.3 [5]	0,082943
9	Мінімально необхідна товщина t_{min1} , мм, пластини з умов міцності	$t_{min1} = \sqrt{\frac{6 \cdot v_{22} p b^2}{[\sigma]}}$	8,095383
10	Ейлерові напруження σ_e , МПа, за відомими критичними	$\sigma_e = \left(\frac{\sigma_{kp}}{\sigma_s} + 2 \left(\frac{\sigma_{kp}}{\sigma_s} \right)^{10} \right) \sigma_s$	504,6564
11	Мінімально необхідна товщина t_{min2} , мм, пластини з умов стійкості	$t_{min2} = 1,118 \cdot 10^{-3} \cdot b \sqrt{\sigma_e}$	17,58076
12	Найбільша товщина t , мм	$t = \max(t_{min1}, t_{min2})$	17,58076
13	Прийнята товщина, мм	округлюється через 0,5мм при товщині листа від 4мм до 20мм і через 1мм для листів більше 20мм	18

Таблиця 4.30 – Параметри поздовжніх балок при фіксованих $n_{II} = 19$ і $n_{\sigma} = 7$


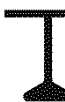


Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi min} = 12,60 \text{ см}^3$; Стискуючі напруження $\sigma_c = 223,25 \text{ МПа}$.									
Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{пр2}, \text{ см}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОСТ 21937–76		5,5	48,47	82,09	13,48	25,00	1,8	3,47	міцності
		8	50,84	232,36	28,29	25,00	1,8	5,84	стійкості
		8	50,84	232,36	28,29	25,00	1,8	5,84	прийнято
ГОСТ 9235 – 76		935	51,82	337,98	37,51	25,00	1,8	6,82	міцності
		935	51,82	337,98	37,51	25,00	1,8	6,82	стійкості
		935	51,82	337,98	37,51	25,00	1,8	6,82	прийнято
РД 5.9373 – 80		14	55,40	1314,45	98,21	25,00	1,8	10,40	міцності
		14	55,40	1314,45	98,21	25,00	1,8	10,40	стійкості

Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 12,60 \text{ см}^3$; Стискуючі напруження $\sigma_c = 223,25 \text{ МПа}$.									
Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
		14	55,40	1314,45	98,21	25,00	1,8	10,40	прийнято
полоса		(5.5*70)	48,85	96,27	12,76	25,00	1,8	3,85	міцності
		(7.5*92)	51,88	240,42	25,71	25,00	1,8	6,88	стійкості
		(7.5*92)	51,88	240,42	25,71	25,00	1,8	6,88	прийнято


Таблиця 4.31 – Параметри бімсів при фіксованих $n_{\text{п}} = 19$ і $n_{\text{б}} = 7$ з умов міцності

Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 2502,063 \text{ см}^3$;									
Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
РД 5.9373 – 80		50а	197,8	89324,31	2520,229	57	1,8	95,2	міцності

Таблиця 4.32 – Параметри бімсів при фіксованих $n_{\text{п}} = 19$ і $n_{\text{б}} = 7$ з умов стійкості

Параметри поздовжніх балок		Параметри бімсів								
Стандарт	Ескіз	Стандарт	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	
ГОСТ 21937–76		$I_{\text{бкр}} = 160640,3 \text{ см}^4$								
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	63а	250,8	192781,8	4945,89	57	1,8	148,2	
ГОСТ 9235 –76		$I_{\text{бкр}} = 169982,6 \text{ см}^4$								
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	63а	250,8	192781,8	4945,89	57	1,8	148,2	
РД 5.9373 – 80		$I_{\text{бкр}} = 183448,2 \text{ см}^4$								
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	63а	250,8	192781,8	4945,89	57	1,8	148,2	
–		$I_{\text{бкр}} = 164329,6 \text{ см}^4$								
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	63а	250,8	192781,8	4945,89	57	1,8	148,2	

Таблиця 4.33 – Параметри прийнятих бімсів при фіксованих $n_{\text{п}} = 19$ і $n_{\text{б}} = 7$ з умов міцності і стійкості

Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
РД 5.9373 – 80		63а	250,8	192781,8	4945,89	57	1,8	148,2	прийнято

Таблиця 4.34 – Маса перекриття, кг, для фіксованих $n_{\text{п}} = 19$ і $n_{\text{б}} = 7$

		Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №8	ГОСТ 9235–76, №935	РД 5.9373–80, №14	полоса, (7.5×92)
Стандарти для бімсів	ГОСТ 21937–76	–	–	–	–
	ГОСТ 9235–76	–	–	–	–
	РД 5.9373 – 80, №63а	36185	36360	37001	36372

Розкладемо масу розраховану в табл. 4.34 за складовими. Абсолютні показники цих складових показано в табл. 4.35, а відносні – в табл. 4.36.

Таблиця 4.35 – Абсолютні складові, кг, маси перекриття з табл. 4.34

№	Складова	Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №8	ГОСТ 9235–76, №935	РД 5.9373–80, №14	полоса, (7.5×92)
1	Настил	23738	23738	23738	23738
2	Поздовжні РЖ	1045	1221	1861	1232
3	Бімси	11401	11401	11401	11401

Таблиця 4.36 – Відносні складові, %, маси перекриття з табл. 4.34

№	Складова	Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №8	ГОСТ 9235–76, №935	РД 5.9373–80, №14	полоса, (7.5×92)
1	Настил	65,60	65,29	64,16	65,27
2	Поздовжні РЖ	2,89	3,36	5,03	3,39
3	Бімси	31,51	31,36	30,81	31,35
4	Σ	100,0	100,0	100,0	100,0

4.5 Аналіз параметрів перекриття при зміні кількості поздовжніх РЖ для фіксованої кількості бімсів

Прослідкуємо зміну параметрів перекриття при фіксованій кількості бімсів, число яких дорівнює $n_{\text{б}} = 5$, а кількість поздовжніх балок змінюється в рамках масиву $n_{\text{п}} = 34, 19, 13$. Власне варіант при $n_{\text{п}} = 19$ був розрахований вище.

Параметри розрахунків представлені нижче.



Фіксовані кількості $n_{\Pi} = 34$, $n_{\sigma} = 5$.

Розрахунок параметрів перекриття аналогічний тому, який був представлений в § 4.3. Тут представлено лише таблиці з даними.

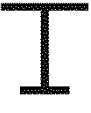

Таблиця 4.37 – Розрахунок товщини пластини настилу ВП при $n_{\Pi} = 34$ і $n_{\sigma} = 5$

№	Пояснення	Формула	Значення
1	Границя плинності	σ_s	235
2	Допустимі напруження матеріалу пластини (сталі) з умов міцності, МПа	$[\sigma]$	160
3	Тиск на поле пластини, Па	p	43000
4	Стискуючі напруження, МПа	$\sigma_c = \sigma_{кр} = 0,95 \cdot \sigma_s$	223,25
5	Коротка сторона пластини, м	b	0,4
6	Довга сторона пластини, м	a	2
7	Відношення	$\gamma = a/b$	5
8	Коефіцієнт	v_{22} за табл. 19.3 [5]	0,0833
9	Мінімально необхідна товщина $t_{\min 1}$, мм, пластини з умов міцності	$t_{\min 1} = \sqrt{\frac{6 \cdot v_{22} p b^2}{[\sigma]}}$	4,635882
10	Ейлерові напруження σ_e , МПа, за відомими критичними	$\sigma_e = \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_s} + 2 \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_s} \right)^{10} \right) \sigma_s$	504,6564
11	Мінімально необхідна товщина $t_{\min 2}$, мм, пластини з умов стійкості	$t_{\min 2} = 1,118 \cdot 10^{-3} \cdot b \sqrt{\sigma_e}$	10,04615
12	Найбільша товщина t , мм	$t = \max(t_{\min 1}, t_{\min 2})$	10,04615
13	Прийнята товщина, мм	округлюється через 0,5мм при товщині листа від 4мм до 20мм і через 1мм для листів більше 20мм	10,5

Таблиця 4.38 – Параметри поздовжніх балок при фіксованих $n_{\Pi} = 34$ і $n_{\sigma} = 5$


Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 29,86 \text{ см}^3$; Стискуючі напруження $\sigma_c = 223,25 \text{ МПа}$.									
Стандарт	Ескіз	№ профілю	f , см ²	i , см ⁴	W_{\min} , см ⁴	c , см	t , см	$f_{пр}$, см ²	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОСТ 21937–76		9	42,03	282,04	33,21	33,33	1,05	7,03	міцності
		10	43,63	408,20	44,48	33,33	1,05	8,63	стійкості
		10	43,63	408,20	44,48	33,33	1,05	8,63	прийнято
ГОСТ 9235 – 76		935	41,82	291,10	34,31	33,33	1,05	6,82	міцності
		1035	43,53	434,25	47,55	33,33	1,05	8,53	стійкості

Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 29,86 \text{ см}^3$;
Стискуючі напруження $\sigma_c = 223,25 \text{ МПа}$.



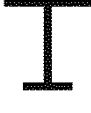

Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		1035	43,53	434,25	47,55	33,33	1,05	8,53	прийнято
РД 5.9373 – 80		14	45,40	1184,26	93,77	33,33	1,05	10,40	міцності
		14	45,40	1184,26	93,77	33,33	1,05	10,40	стійкості
		14	45,40	1184,26	93,77	33,33	1,05	10,40	прийнято
полоса		(8.*1.e+002)	43,25	291,50	29,90	33,33	1,05	8,25	міцності
		(8.5*1.1e+002)	44,23	352,93	34,80	33,33	1,05	9,23	стійкості
		(8.5*1.1e+002)	44,23	352,93	34,80	33,33	1,05	9,23	прийнято

Таблиця 4.39 – Параметри бiмсів при фіксованих $n_{\text{п}} = 34$ і $n_{\text{б}} = 5$ з умов міцності


Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 3336,083 \text{ см}^3$;

Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РД 5.9373 – 80		56a	203,2	118342,1	3420,145	76	1,05	123,4	міцності

Таблиця 4.40 – Параметри бiмсів при фіксованих $n_{\text{п}} = 34$ і $n_{\text{б}} = 5$ з умов стійкості

Параметри поздовжніх балок		Параметри бiмсів							
Стандарт	Ескіз	Стандарт	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОСТ 21937–76		$I_{\text{бкр}} = 179102,3 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	71a	272,6	257388,3	6842,582	76	1,05	192,8
ГОСТ 9235 –76		$I_{\text{бкр}} = 179876,9 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	71a	272,6	257388,3	6842,582	76	1,05	192,8
РД 5.9373 – 80		$I_{\text{бкр}} = 191378,6 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	71a	272,6	257388,3	6842,582	76	1,05	192,8
–		$I_{\text{бкр}} = 177332,7 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	71a	272,6	257388,3	6842,582	76	1,05	192,8

Таблиця 4.41 – Параметри прийнятих бімсів при фіксованих $n_{\pi} = 34$ і $n_{\sigma} = 5$ з умов міцності і стійкості

Стандарт	Ескіз	№ профілю	f , см ²	i , см ⁴	W_{\min} , см ⁴	c , см	t , см	$f_{пр}$, см ²	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РД 5.9373 – 80		71a	272,6	257388,3	6842,582	76	1,05	192,8	прийнято

Таблиця 4.42 – Маса перекриття, кг, для фіксованих $n_{\pi} = 34$ і $n_{\sigma} = 5$

		Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №10	ГОСТ 9235–76, №1035	РД 5.9373–80, №14	полоса, (8.5*110)
Стандарти для бімсів	ГОСТ 21937–76	–	–	–	–
	ГОСТ 9235–76	–	–	–	–
	РД 5.9373 – 80, №71a	27206	27174	27773	27398

Розкладемо масу розраховану в табл. 4.42 за складовими. Абсолютні показники цих складових показано в табл. 4.43, а відносні – в табл. 4.44.

Таблиця 4.43 – Абсолютні складові, кг, маси перекриття з табл. 4.42

№	Складова	Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №10	ГОСТ 9235–76, №1035	РД 5.9373–80, №14	полоса, (8.5*110)
1	Настил	13847	13847	13847	13847
2	Поздовжні РЖ	2764	2732	3331	2956
3	Бімси	10594	10594	10594	10594

Таблиця 4.44 – Відносні складові, %, маси перекриття з табл. 4.42

№	Складова	Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №10	ГОСТ 9235–76, №1035	РД 5.9373–80, №14	полоса, (8.5*110)
1	Настил	50,90	50,96	49,86	50,54
2	Поздовжні РЖ	10,16	10,05	11,99	10,79
3	Бімси	38,94	38,99	38,15	38,67
4	Σ	100,0	100,0	100,0	100,0

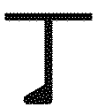
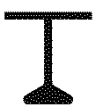
Фіксовані кількості $n_{II} = 13$, $n_{\sigma} = 5$.

Розрахунок параметрів перекриття аналогічний тому, який був представлений в § 4.3. Тут представлено лише таблиці з даними.



Таблиця 4.45 – Розрахунок товщини пластини настилу ВП при $n_{II} = 13$ і $n_{\sigma} = 5$

№	Пояснення	Формула	Значення
1	Границя плинності	σ_s	235
2	Допустимі напруження матеріалу пластини (сталі) з умов міцності, МПа	$[\sigma]$	160
3	Тиск на поле пластини, Па	p	43000
4	Стискуючі напруження, МПа	$\sigma_c = \sigma_{kp} = 0,95 \cdot \sigma_s$	223,25
5	Коротка сторона пластини, м	b	1
6	Довга сторона пластини, м	a	2
7	Відношення	$\gamma = a/b$	2
8	Коефіцієнт	v_{22} за табл. 19.3 [5]	0,0829
9	Мінімально необхідна товщина t_{min1} , мм, пластини з умов міцності	$t_{min1} = \sqrt{\frac{6 \cdot v_{22} p b^2}{[\sigma]}}$	11,56185
10	Ейлерові напруження σ_e , МПа, за відомими критичними	$\sigma_e = \left(\frac{\sigma_{kp}}{\sigma_s} + 2 \left(\frac{\sigma_{kp}}{\sigma_s} \right)^{10} \right) \sigma_s$	504,6564
11	Мінімально необхідна товщина t_{min2} , мм, пластини з умов стійкості	$t_{min2} = 1,118 \cdot 10^{-3} \cdot b \sqrt{\sigma_e}$	25,11538
12	Найбільша товщина t , мм	$t = \max(t_{min1}, t_{min2})$	25,11538
13	Прийнята товщина, мм	округлюється через 0,5мм при товщині листа від 4мм до 20мм і через 1мм для листів більше 20мм	26

Таблиця 4.46 – Параметри поздовжніх балок при фіксованих $n_{II} = 13$ і $n_{\sigma} = 5$


Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 29,86 \text{ см}^3$; Стискуючі напруження $\sigma_c = 223,25 \text{ МПа}$.									
Стандарт	Ескіз	№ профілю	f , см ²	i , см ⁴	W_{\min} , см ⁴	c , см	t , см	$f_{пр}$, см ²	Умова
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
ГОСТ 21937–76		8	92,51	306,81	34,48	33,33	2,6	5,84	міцності
		12	97,80	978,70	79,62	33,33	2,6	11,13	стійкості
		12	97,80	978,70	79,62	33,33	2,6	11,13	прийнято
ГОСТ 9235 – 76		935	93,49	428,14	43,79	33,33	2,6	6,82	міцності
		1235	96,82	962,95	78,06	33,33	2,6	10,15	стійкості
		1235	96,82	962,95	78,06	33,33	2,6	10,15	прийнято

Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 29,86 \text{ см}^3$;
Стискуючі напруження $\sigma_c = 223,25 \text{ МПа}$.

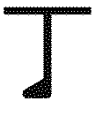
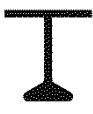


Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РД 5.9373 – 80		14	97,07	1542,77	105,31	33,33	2,6	10,40	міцності
		14	97,07	1542,77	105,31	33,33	2,6	10,40	стійкості
		14	97,07	1542,77	105,31	33,33	2,6	10,40	прийнято
полоса		(4.*3.4)	86,80	49,11	30,07	33,33	2,6	0,13	міцності
		(10*1.2e+002)	99,02	810,35	63,70	33,33	2,6	12,35	стійкості
		(10*1.2e+002)	99,02	810,35	63,70	33,33	2,6	12,35	прийнято

Таблиця 4.47 – Параметри бімсів при фіксованих $n_{\text{п}} = 13$ і $n_{\text{б}} = 5$ з умов міцності


Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 3336,083 \text{ см}^3$;

Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РД 5.9373 – 80		56a	321	165059,6	3769,814	76	2,6	123,4	міцності

Таблиця 4.48 – Параметри бімсів при фіксованих $n_{\text{п}} = 13$ і $n_{\text{б}} = 5$ з умов стійкості

Параметри поздовжніх балок		Параметри бімсів							
Стандарт	Ескіз	Стандарт	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОСТ 21937–76		$I_{\text{б кр}} = 161695 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	56a	321	165059,6	3769,814	76	2,6	123,4
ГОСТ 9235 –76		$I_{\text{б кр}} = 159984,3 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	56a	321	165059,6	3769,814	76	2,6	123,4
РД 5.9373 – 80		$I_{\text{б кр}} = 163459,7 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	56a	321	165059,6	3769,814	76	2,6	123,4
–		$I_{\text{б кр}} = 159519,3 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	56a	321	165059,6	3769,814	76	2,6	123,4

Таблиця 4.49 – Параметри прийнятих бімсів при фіксованих $n_{\text{п}} = 13$ і $n_{\text{б}} = 5$ з умов міцності і стійкості

Стандарт	Ескіз	№ профілю	f , см ²	i , см ⁴	W_{min} , см ⁴	c , см	t , см	$f_{\text{пр}}$, см ²	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РД 5.9373 – 80		56а	321	165059,6	3769,814	76	2,6	123,4	прийнято

Таблиця 4.50 – Маса перекриття, кг, для фіксованих $n_{\text{п}} = 13$ і $n_{\text{б}} = 5$

		Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №12	ГОСТ 9235–76, №1235	РД 5.9373–80, №14	полоса, (10*120)
Стандарти для бімсів	ГОСТ 21937–76	–	–	–	–
	ГОСТ 9235–76	–	–	–	–
	РД 5.9373 – 80, №56а	42433	42313	42343	42582

Розкладемо масу розраховану в табл. 4.50 за складовими. Абсолютні показники цих складових показано в табл. 4.51, а відносні – в табл. 4.52.

Таблиця 4.51 – Абсолютні складові, кг, маси перекриття з табл. 4.50

№	Складова	Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №12	ГОСТ 9235–76, №1235	РД 5.9373–80, №14	полоса, (10*120)
1	Настил	34289	34289	34289	34289
2	Поздовжні РЖ	1363	1243	1274	1513
3	Бімси	6781	6781	6781	6781

Таблиця 4.52 – Відносні складові, %, маси перекриття з табл. 4.50

№	Складова	Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №10	ГОСТ 9235–76, №1035	РД 5.9373–80, №14	полоса, (8.5*110)
1	Настил	80,81	81,04	80,98	80,52
2	Поздовжні РЖ	3,21	2,94	3,01	3,55
3	Бімси	15,98	16,03	16,01	15,92
4	Σ	100,0	100,0	100,0	100,0



Фіксовані кількості $n_{II} = 25$, $n_{\sigma} = 5$.

Розрахунок параметрів перекриття аналогічний тому, який був представлений в § 4.3. Тут представлено лише таблиці з даними.



Таблиця 4.53 – Розрахунок товщини пластини настилу ВП при $n_{II} = 25$ і $n_{\sigma} = 5$

№	Пояснення	Формула	Значення
1	Границя плинності	σ_s	235
2	Допустимі напруження матеріалу пластини (сталі) з умов міцності, МПа	$[\sigma]$	160
3	Тиск на поле пластини, Па	p	43000
4	Стискуючі напруження, МПа	$\sigma_c = \sigma_{kp} = 0,95 \cdot \sigma_s$	223,25
5	Коротка сторона пластини, м	b	0,538462
6	Довга сторона пластини, м	a	2
7	Відношення	$\gamma = a/b$	3,714286
8	Коефіцієнт	v_{22} за табл. 19.3 [5]	0,083271
9	Мінімально необхідна товщина t_{min1} , мм, пластини з умов міцності	$t_{min1} = \sqrt{\frac{6 \cdot v_{22} p b^2}{[\sigma]}}$	6,23954
10	Ейлерові напруження σ_e , МПа, за відомими критичними	$\sigma_e = \left(\frac{\sigma_{kp}}{\sigma_s} + 2 \left(\frac{\sigma_{kp}}{\sigma_s} \right)^{10} \right) \sigma_s$	504,6564
11	Мінімально необхідна товщина t_{min2} , мм, пластини з умов стійкості	$t_{min2} = 1,118 \cdot 10^{-3} \cdot b \sqrt{\sigma_e}$	13,52366
12	Найбільша товщина t , мм	$t = \max(t_{min1}, t_{min2})$	13,52366
13	Прийнята товщина, мм	округлюється через 0,5мм при товщині листа від 4мм до 20мм і через 1мм для листів більше 20мм	14

Таблиця 4.54 – Параметри поздовжніх балок при фіксованих $n_{II} = 25$ і $n_{\sigma} = 5$


Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi min} = 29,86 \text{ см}^3$; Стискуючі напруження $\sigma_c = 223,25 \text{ МПа}$.									
Стандарт	Ескіз	№ профілю	f , см ²	i , см ⁴	W_{min} , см ⁴	c , см	t , см	$f_{пр}$, см ²	Умова
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
ГОСТ 21937–76		9	53,70	309,58	34,91	33,33	1,4	7,03	міцності
		10	55,30	446,93	46,51	33,33	1,4	8,63	стійкості
		10	55,30	446,93	46,51	33,33	1,4	8,63	прийнято
ГОСТ 9235 – 76		935	53,49	318,88	35,98	33,33	1,4	6,82	міцності
		1035	55,20	474,65	49,57	33,33	1,4	8,53	стійкості
		1035	55,20	474,65	49,57	33,33	1,4	8,53	прийнято

Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 29,86 \text{ см}^3$;
Стискуючі напруження $\sigma_c = 223,25 \text{ МПа}$.




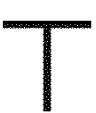
Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РД 5.9373 – 80		14	57,07	1279,17	96,30	33,33	1,4	10,40	міцності
		14	57,07	1279,17	96,30	33,33	1,4	10,40	стійкості
		14	57,07	1279,17	96,30	33,33	1,4	10,40	прийнято
полоса		(8.*1.e+002)	54,74	303,28	30,50	33,33	1,4	8,07	міцності
		(9.*1.1e+002)	56,88	458,02	42,00	33,33	1,4	10,22	стійкості
		(9.*1.1e+002)	56,88	458,02	42,00	33,33	1,4	10,22	прийнято

Таблиця 4.55 – Параметри бімсів при фіксованих $n_{\text{п}} = 25$ і $n_{\text{б}} = 5$ з умов міцності


Необхідний мінімальний момент інерції $W_{\phi \min} = 3336,083 \text{ см}^3$;

Стандарт	Ескіз	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РД 5.9373 – 80		56a	229,8	132372,8	3536,678	76	1,4	123,4	міцності

Таблиця 4.56 – Параметри бімсів при фіксованих $n_{\text{п}} = 25$ і $n_{\text{б}} = 5$ з умов стійкості

Параметри поздовжніх балок		Параметри бімсів							
Стандарт	Ескіз	Стандарт	№ профілю	$f, \text{ см}^2$	$i, \text{ см}^4$	$W_{\min}, \text{ см}^4$	$c, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$f_{\text{пр}}, \text{ см}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОСТ 21937–76		$I_{\text{бкр}} = 165076,1 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	63a	254,6	194358,4	4945,956	76	1,4	148,2
ГОСТ 9235 –76		$I_{\text{бкр}} = 166459,7 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	63a	254,6	194358,4	4945,956	76	1,4	148,2
РД 5.9373 – 80		$I_{\text{бкр}} = 178691,1 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	63a	254,6	194358,4	4945,956	76	1,4	148,2
–		$I_{\text{бкр}} = 169696,5 \text{ см}^4$							
		ГОСТ 21937–76	none	0	0	0	0	0	0
		ГОСТ 9235 –76	none	0	0	0	0	0	0
		РД 5.9373 – 80	63a	254,6	194358,4	4945,956	76	1,4	148,2

Таблиця 4.57 – Параметри прийнятих бімсів при фіксованих $n_{\pi} = 25$ і $n_{\sigma} = 5$ з умов міцності і стійкості

Стандарт	Ескіз	№ профілю	f , см ²	i , см ⁴	W_{\min} , см ⁴	c , см	t , см	$f_{пр}$, см ²	Умова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РД 5.9373 – 80		63а	254,6	194358,4	4945,956	76	1,4	148,2	прийнято

Таблиця 4.58 – Маса перекриття, кг, для фіксованих $n_{\pi} = 25$ і $n_{\sigma} = 5$

		Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №10	ГОСТ 9235–76, №1035	РД 5.9373–80, №14	полоса, (9*110)
Стандарти для бімсів	ГОСТ 21937–76	–	–	–	–
	ГОСТ 9235–76	–	–	–	–
	РД 5.9373 – 80, №63а	28639	28616	29056	29013

Розкладемо масу розраховану в табл. 4.58 за складовими. Абсолютні показники цих складових показано в табл. 4.59, а відносні – в табл. 4.60.

Таблиця 4.59 – Абсолютні складові, кг, маси перекриття з табл. 4.58

№	Складова	Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №10	ГОСТ 9235–76, №1035	РД 5.9373–80, №14	полоса, (9*110)
1	Настил	18463	18463	18463	18463
2	Поздовжні РЖ	2032	2009	2449	2406
3	Бімси	8144	8144	8144	8144

Таблиця 4.60 – Відносні складові, %, маси перекриття з табл. 4.58

№	Складова	Стандарти для поздовжніх балок			
		ГОСТ 21937–76, №10	ГОСТ 9235–76, №1035	РД 5.9373–80, №14	полоса, (9*110)
1	Настил	64,47	64,52	63,54	63,64
2	Поздовжні РЖ	7,10	7,02	8,43	8,29
3	Бімси	28,44	28,46	28,03	28,07
4	Σ	100,0	100,0	100,0	100,0

4.6 Аналіз отриманих результатів

Для проведення аналізу отриманих результатів випишемо значення мас перекриття в залежності від кількості поздовжніх та поперечних балок для кожного зі стандартів поздовжніх балок. Вказані результати розміщені в табл. 4.61.

Таблиця 4.61 – Маса перекриття в залежності від $n_{\text{п}}$ і $n_{\text{б}}$

№	Стандарти поздовжніх балок				Кількість балок	
	ГОСТ 21937–76	ГОСТ 9235–76	РД 5.9373–80, №14	полоса	поздовжніх $n_{\text{п}}$	бімсів $n_{\text{б}}$
1	31835	31572	31488	32494	19	3
2	33874	33699	33743	33885	19	5
3	36185	36360	37001	36372	19	7
4	27206	27174	27773	27398	34	5
5	42433	42313	42343	42582	13	5
6	28639	28616	29056	29013	25	5

Графік розподілу маси ВП в залежності від кількості бімсів $n_{\text{б}}$ при фіксованій кількості поздовжніх РЖ $n_{\text{п}} = 19$ представлено на рис. 4.6, де вздовж горизонтальної осі відмічена кількість бімсів, а вздовж вертикальної – маса перекриття. На рис. 4.6 залежності для різних стандартів профілів поздовжніх РЖ практично зливаються в одну, а тому вони не пронумеровані.

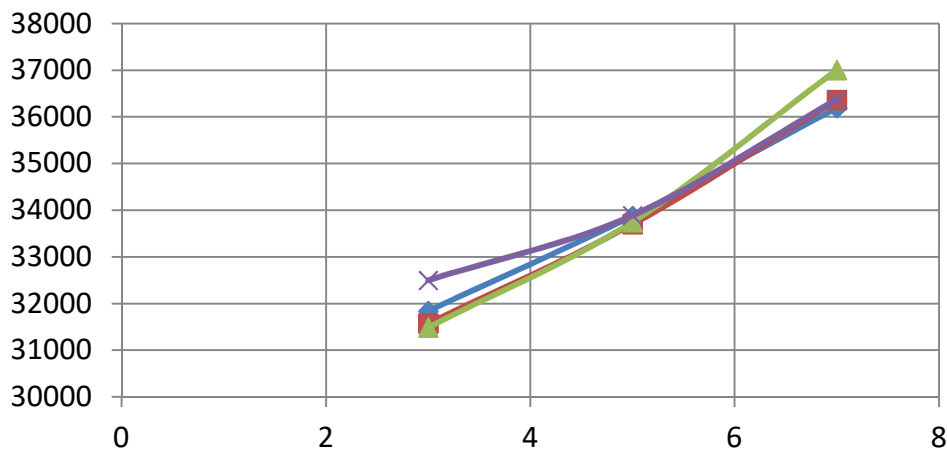


Рис. 4.6 – Залежності маси перекриття від числа бімсів при фіксованій кількості поздовжніх РЖ $n_{\text{п}} = 19$

Графік розподілу маси ВП в залежності від кількості поздовжніх РЖ $n_{\text{п}}$ при фіксованій кількості бімсів $n_{\text{б}} = 5$ представлено на рис. 4.7, де вздовж горизонтальної осі відмічена кількість бімсів, а вздовж вертикальної – маса перекриття. На рис. 4.7 залежності для різних стандартів профілів поздовжніх РЖ практично зливаються в одну, а тому вони не пронумеровані.

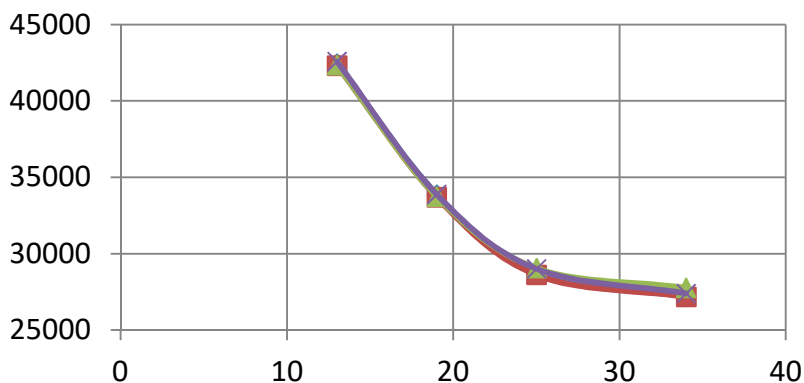


Рис. 4.7 – Залежності маси перекриття від числа поздовжніх РЖ при фіксованій кількості бімсів $n_{\text{б}} = 5$

Аналізуючи графіки на рис. 4.6 та 4.7 можна зробити наступні висновки. При збільшенні числа бімсів маса перекриття зростає практично лінійно. При збільшенні кількості бімсів з 3 до 7 при фіксованій кількості поздовжніх РЖ маса перекриття зростає приблизно на 14%.

При збільшенні числа поздовжніх балок з 13 до 34, що відповідає зміні розмірів пластини b (рис. 4.1) між поздовжніми РЖ від 1,0 до 0,4 м маса перекриття зменшується приблизно на 36%. При чому, як видно з графіка на рис. 4.7 для кількості поздовжніх РЖ настає такий момент, коли подальше збільшення кількості поздовжніх РЖ не призводить до суттєвого зменшення маси перекриття. На рис. 4.7 вже починаючи з кількості поздовжніх РЖ рівним $n_{\text{п}} = 23 \div 26$ зміна маси перекриття практично заходить в асимптоту. Зміна числа поздовжніх РЖ від $n_{\text{п}} = 25$ до $n_{\text{п}} = 35$ призводить до зменшення маси перекриття лише на 5%. Проте збільшення кількості поздовжніх РЖ може призводити до подорожчання виробництва перекриття ВП. В цьому випадку необхідний економічно-вартісний аналіз з врахуванням технологічних факторів, що виходить за рамки даної роботи.

Зміна маси поздовжніх РЖ в залежності від їх числа при фіксованій кількості бімсів представлена на графіках рис. 4.8.

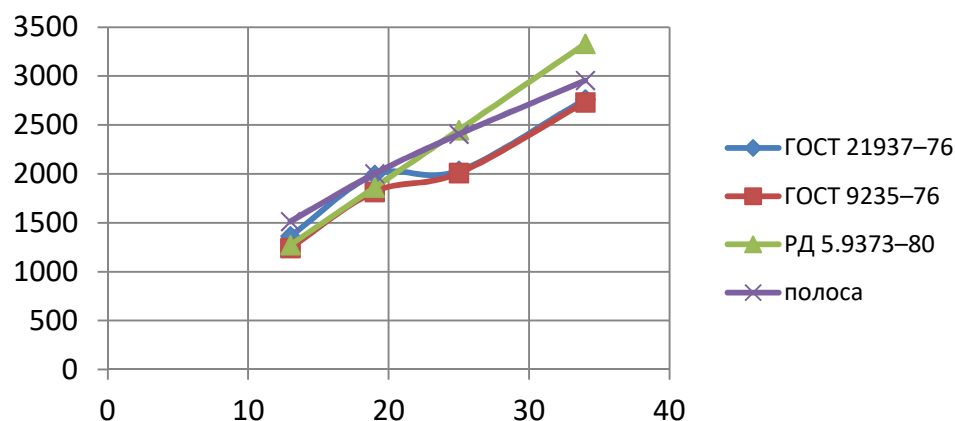


Рис. 4.8 – Залежності маси поздовжніх РЖ від їх числа при фіксованій кількості бімсів $n_6 = 5$

З графіків на рис. 4.8 видно, що при збільшенні кількості поздовжніх РЖ від 13 до 34, що відповідає зміні розмірів пластини b (рис. 4.1) між поздовжніми РЖ від 1,0 до 0,4 м маса поздовжніх РЖ зростає приблизно в $(2 \div 2,5)$ рази, хоча маса перекриття, як вже було сказано зменшується на $1/3$. Саме збільшення маси поздовжніх РЖ призводить до збільшення собівартості виготовлення перекриття, тому що питома вартість (вартість за тону прокату) профільного металопрокату як правило є вищою, аніж вартість листового металопрокату. Тут також необхідні додаткові вартісно-економічні дослідження з врахуванням технологічних факторів.

Таким чином саме поздовжні РЖ відіграють одну з вирішальних ролей в масових та економічно-вартісних показниках при проектуванні та виробництві перекриття ВП.

Тим часом листовий настил ВП становить $50 \div 80\%$ від загальної маси перекриття. Як показали розрахунки, найбільша товщина листів ВП отримується з умов стійкості, аніж з умов міцності. Тому заходи щодо зменшення товщини настилу ВП є також потрібними. Для даної схеми ВП (рис. 4.1) цими заходами є застосування листів з підвищеною границею плинності і більш якісний розрахунок сумарних згинальних моментів, які дадуть точні значення стискуючих

напружень, щоб не застосовувати значення граничного згинального моменту в умовах невизначеності, який дає завищену товщину настилу ВП. Але опрацювання вказаних заходів виходить за межі даного дослідження.

4.7 Розробка технології виготовлення секції перекриття ВП

В цьому розділі представлено принципіальну технологію виготовлення перекриття ВП. Як видно з розрахунків, товщини тонкостінних елементів в більшості випадків перевищують 5 мм, а тому в технологічні процеси закладаємо процес розділки кромки. У випадку, якщо для зварювання буде використовуватися напівавтомат, то розділку кромки в операціях над поздовжніми і поперечними РЖ виконувати не треба.

Принципіальна технологія виготовлення секції ВП представлена наступними кроками.

1) Виготовлення поздовжніх РЖ.

Катані профілі. Якщо прийняті поздовжні РЖ є катаними профілями, то необхідно виконати тільки розділку верхньої кромки, якою ці профілі кріпляться до настилу ВП.

Час T розділки кромки поздовжніх РЖ визначиться залежністю

$$T = n_n \cdot l \cdot t_{кр1м}, \quad (23)$$

а вартість V розділки кромки всіх поздовжніх РЖ обчислюється за формулою

$$V = n_n \cdot l \cdot p_{кр1м}, \quad (24)$$

де пояснення для цих формул надані в § 3.3.

Зварний тавр і полоса. Якщо поздовжні РЖ є зварними таврами згідно РД 5.9373–80 або половою, то їх необхідно виготовляти. Технологічний процес виробництва і принципові залежності розрахунку вартості виготовлення цих РЖ були описані в § 3.3.

Час виготовлення поздовжніх РЖ у вигляді зварного тавра за РД 5.9373–80 визначиться формулою

$$T = n_n \cdot l \cdot (2t_{pi1м} + 2t_{кр1м} + 2t_{зв1м}), \quad (25)$$

де t_{pi1m} , t_{kp1m} , t_{ze1m} – час виконання операцій відповідно різки, обробки кромки та зварювання для 1 метру погонного.

Час T виготовлення полоси визначається виразом

$$T = n_n \cdot l \cdot (t_{pi1m} + t_{kp1m}), \quad (26)$$

2) Виготовлення бімсів. Бімси виготовляються згідно технологічного процесу описаного в § 3.3 для зварного тавру, але тут додаються технологічні операції вирізу сквозних отворів для поздовжніх РЖ.

Вартість V виготовлення усіх бімсів визначається залежністю, аналогічною до (22), але вже враховуючи всі обробки кромки і виріз сквозних отворів

$$V = p_{m1r} \cdot m_n + 2n_o \cdot L \cdot (p_{pi1m} + p_{kp1m} + p_{ze1m}) + n_o \cdot n_n \cdot p_{pi1m} \cdot 0,4, \quad (27)$$

де використані пояснення для формули (22), а остання складова враховує вирізання отворів/проходів для поздовжніх РЖ, де довжина різки одного отвору взята рівною 0,4 м, що відповідає приблизно подвійній найбільшій висоті профілю поздовжньої балки із серійних розрахунків.

Час T виготовлення всіх бімсів обчислюється за залежністю

$$T = 2n_o \cdot L \cdot (t_{pi1m} + t_{kp1m} + t_{ze1m}) + n_o \cdot n_n \cdot t_{pi1m} \cdot 0,4, \quad (28)$$

де t_{pi1m} , t_{kp1m} , t_{ze1m} – час виконання операцій відповідно різки, обробки кромки та зварювання для 1 метру погонного.

3) Виготовлення настилу ВП. Настил ВП виготовляється з однотипних листів з однієї партії. Розміри ВП складають $l = 12$ м, $L = 14$ м (рис. 4.1). При виготовленні вказаного полотна необхідно подбати, щоб зварні шви не попали на перегородки, на елементи опорного контуру, на лінії розміщення поздовжніх і поперечних балок. Відстань між паралельним швами повинна бути не меншою за 75 мм. При цьому необхідно замовляти такі типорозміри партії листів, щоб мінімізувати операції їх різки (і заодно розділки кромки) з метою уникнення накладання стикових зварних швів листів і швів поздовжніх і поперечних балок. Також необхідно враховувати транспортні можливості виробництва, де буде збиратися перекриття ВП. Звісно, чим довші листи, тим краще.

Для випадку, описаному в § 3.3, при числі поздовжніх РЖ $n_n = 19$ і числі бімсів $n_o = 5$, що відповідає розмірам пластини $a = 2$ м, $b = 0,7$ м. (рис. 4.1) може

бути рекомендована наступна процедура, як допоможе уникненню накладання швів.

Вводиться точка відліку, наприклад на лівому борті. Від цієї точки відліку визначаються координати прикріплення поздовжніх РЖ $y_{рж}$ і координат стику листів $y_{л}$. Приймаємо листи шириною 2,5 м і довжиною 12 м. Листи розміщуються вздовж перекриття. Варіюючи параметр d (рис. 4.9), підбираємо таке розташування листів, щоб: відстань між паралельними швами була не менше 75 мм; уникнути різки листів вздовж; листи заходили за границі поздовжніх внутрішніх бортових перегородок (або за границі опорного контуру) більше ніж на 75 мм, тобто $e > 75$ мм і $d > 75$ мм.

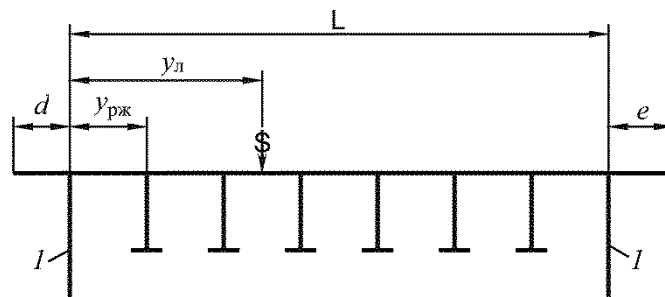


Рис. 4.9 – Схема для розмітки листів: 1-лист внутрішньої поздовжньої бортової перегородки

Підбір параметра d виконується шляхом послідовного обчислення модуля різниць між координатами поздовжніх РЖ $y_{рж}$ і стикуми поздовжніх листів $y_{л}$. Вказаний розрахунок представлено в табл. 4.62.

Таблиця 4.62 – Різниці координат $y_{рж}$ і $y_{л}$

Координати поздовжніх РЖ $y_{рж}$, М	Координати стику листів $y_{л}$, М						
	-0,3	2,2	4,7	7,2	9,7	12,2	14,7
0	0,3	2,2	4,7	7,2	9,7	12,2	14,7
0,7	1	1,5	4	6,5	9	11,5	14
1,4	1,7	0,8	3,3	5,8	8,3	10,8	13,3
2,1	2,4	0,1	2,6	5,1	7,6	10,1	12,6
2,8	3,1	0,6	1,9	4,4	6,9	9,4	11,9
3,5	3,8	1,3	1,2	3,7	6,2	8,7	11,2
4,2	4,5	2	0,5	3	5,5	8	10,5
4,9	5,2	2,7	0,2	2,3	4,8	7,3	9,8

Координати поздовжніх РЖ $u_{рж}$, М	Координати стику листів $u_{л}$, М						
	-0,3	2,2	4,7	7,2	9,7	12,2	14,7
5,6	5,9	3,4	0,9	1,6	4,1	6,6	9,1
6,3	6,6	4,1	1,6	0,9	3,4	5,9	8,4
7	7,3	4,8	2,3	0,2	2,7	5,2	7,7
7,7	8	5,5	3	0,5	2	4,5	7
8,4	8,7	6,2	3,7	1,2	1,3	3,8	6,3
9,1	9,4	6,9	4,4	1,9	0,6	3,1	5,6
9,8	10,1	7,6	5,1	2,6	0,1	2,4	4,9
10,5	10,8	8,3	5,8	3,3	0,8	1,7	4,2
11,2	11,5	9	6,5	4	1,5	1	3,5
11,9	12,2	9,7	7,2	4,7	2,2	0,3	2,8
12,6	12,9	10,4	7,9	5,4	2,9	0,4	2,1
13,3	13,6	11,1	8,6	6,1	3,6	1,1	1,4
14	14,3	11,8	9,3	6,8	4,3	1,8	0,7
Найменші різниці за модулем	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,7

Коментуючи табл. 4.62 необхідно відмітити, що власне перша і останні координати $u_{рж}$ не є координатами прикріплення поздовжніх РЖ, а є координатами положення поздовжніх внутрішніх листів бортового перекриття. В табл. 4.62 перша координата $u_{л}$ означає $d = 0,3$ м (рис. 4.9), а найменша різниця за модулем $e = 0,7$ м.

Як бачимо з табл. 4.62 найменші різниці за модулем становлять більше 75 мм = 0,075м. Це означає, що даний варіант розміщення листів є прийнятним з точки зору зазначених вище вимог за зварюванням. А тому цей варіант приймається до опрацювання в якості робочого. З табл. 4.62, орієнтуючись на рис. 4.9, враховуючи вище надані пояснення можна встановити, що необхідно 6 листів $2,5 \times 12$ м. Необхідно враховувати напуски на поперечні перегородки, а так як довжина перекриття $l = 12$ м, то напустивши лист за опорний контур однієї перегородки, ми отримаємо оголення протилежної перегородки (рис. 4.10). Але те оголення перекриється сусідніми листами сусідньої секції ВП. Якщо ж розроблювана секція ВП є кінцевою, то на оголеній ділянці може бути встановлено поздовжній лист потрібної ширини.

Перед зварюванням полотна секції ВП з листів металу виконується операція розділки кромки кожного з листів по всьому контуру, тому що товщина для розгляданого випадку сягає 18 мм. Розділку бажано виконувати двохсторонньою. Листи будуть стикуватися між собою, а до полотна теж будуть пристиковуватися листи, тому розділка кромки вказана по всьому периметру для кожного листа.

Вартість V розділки кромки у вказаному випадку для листів визначається залежністю

$$V = 2(u + w) \cdot n_{\text{л}} \cdot p_{\text{кр1м}}, \quad (29)$$

де $u = 12$ м – довжина листа; $w = 2,5$ м – ширина листа; $n_{\text{л}} = 6$ – кількість листів.

Час T розділки кромки у вказаному випадку для листів визначається залежністю

$$T = 2(u + w) \cdot n_{\text{л}} \cdot t_{\text{кр1м}}. \quad (30)$$

Зварювання полотна секції ВП виконується по $n_{\text{л}} - 1 = 6 - 1 = 5$ стиках (рис. 4.10) з обох боків відносно площини листа (два шва).

Вартість V та час T зварювання полотна секції ВП визначаються відповідно залежностями

$$V = 2 \cdot (n_{\text{л}} - 1) l \cdot p_{\text{зв1м}}, \quad (31)$$

$$T = 2 \cdot (n_{\text{л}} - 1) l \cdot t_{\text{зв1м}}. \quad (32)$$

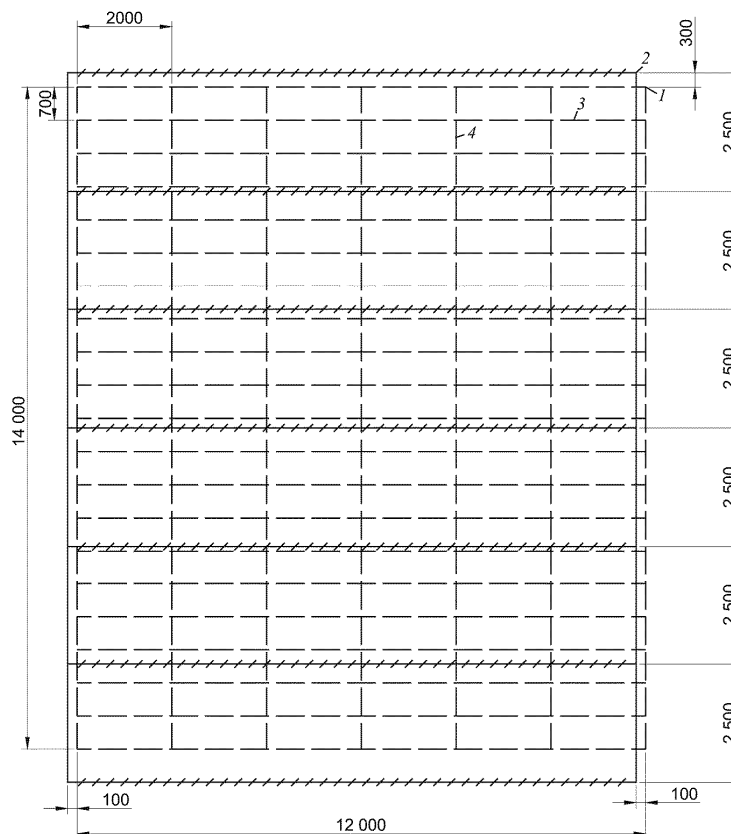


Рис. 4.10 – Схема технологічного розміщення листів і балок секції ВП: 1 – контур секції; 2 – листи; 3 – поздовжні РЖ; 4 – бімси

4) Приварювання набору до настилу ВП. Поздовжні балки і бімси приварюються до настилу ВП вздовж по обидва боки. При цьому, як вже було сказано вище, кромки, якими балки набору приєднуються до настилу мають попередню розділку кромки.

Вартість V та час T приварювання балок набору до полотна секції ВП визначаються відповідно залежностями

$$V = 2 \cdot (n_n l + n_o L) \cdot p_{зв1м}, \quad (33)$$

$$T = 2 \cdot (n_n l + n_o L) \cdot t_{зв1м}. \quad (34)$$

Зауваження. При розрахунку вартості виготовлення V і часу виконання T технологічних операцій необхідно враховувати, що для кожного випадку питома вартість p і час t таких операцій як різка, розділка кромки і зварювання повинні визначатися окремо. Тому що умови реального виробництва можуть бути різними. Вид зварювання може бути різний. Десь можливо використовувати різні

діаметри дроту в напівавтоматі, а десь – ні. Якщо зварювання ручне, то розділка кромки, яка описана вище у всіх випадках обов'язкова. Операція фарбування не врахована.

ВИСНОВКИ

В рамках магістерської роботи були вирішені всі поставлені задачі для досягнення поставленої мети роботи.

1) З рівняння мас у функції від водотоннажності була знайдена масова водотоннажність у 1-му наближенні, з якої у свою чергу були отримані головні розміри та очікувана потужність. З отриманих розмірів з 1-го наближення було сформовано рівняння мас у функції від головних розмірів, з якого була знайдена масова водотоннажність у 2-му наближенні, і відповідно знову знайдені головні розміри і допоміжні величини.

2) Згідно Правил класифікаційного товариства України були розраховані елементи корпусу судна для навантажень, які відповідають суховантажнику.

3) В рамках варіювання числа поздовжніх РЖ і бімсів були зроблені наступні висновки. При збільшенні числа бімсів маса перекриття зростає практично лінійно. При збільшенні числа поздовжніх балок маса перекриття зменшується. Динаміка зменшення маси перекриття при зростанні числа поздовжніх РЖ є більшою, ніж динаміка росту маси перекриття при збільшенні числа бімсів. Проте збільшення кількості поздовжніх РЖ може призвести до подорожчання виробництва, не дивлячись на загальне зменшення маси перекриття при цьому.

Для кожного з варіантів фіксованого числа поздовжніх РЖ і бімсів була проаналізована можливість застосування таких поздовжніх профілів як катаних, зварних та полоси та створено відповідні математичні моделі економічно-вартісного аналізу з врахуванням технологічних факторів, які дозволять прийняти рішення щодо вибору конкретного профілю в умовах даного постачання і виробництва.

Було показано, що маса листового настилу складає 50÷80% від загальної маси перекриття і запропоновані заходи для зменшення маси листового настилу та озвучені деякі з них для майбутнього опрацювання.

Була розроблена принципіальна схема технологічного процесу виготовлення секції ВП, яка може бути масштабована під конкретні умови постачання і виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Разгонов С. А. Скорочений конспект лекцій з навчальної дисципліни «Загальний курс транспорту» (для студентів 1 курсу денної форми навчання за напрямом підготовки 6.070101 – «Транспортні технології (за видами транспорту)»). 2023.
- 2 Васильєв О. Л. Логістична інфраструктура. 2019.
- 3 Краснокутський В. М., Самородов В. Б., Селевич С. Г. Спеціалізований рухомий склад на автомобільному транспорті. Харків: Друкарня Мадрид, 2020.
- 4 Міщенко О. О. Наявність деревних ресурсів та показники їх використання у філії «Гутянське лісове господарство» ДП «Ліси України». 2023.
- 5 Справочник по строительной механике корабля./Бойцов Г.В., Палий О.М., Постнов В.А., Чувиковский В.С. – В трех томах. Том 2. Пластины. Теория упругости, пластичности и ползучести. Численные методы. – Л.: Судостроение, 1982. – 464 с., ил.
- 6 Справочник по строительной механике корабля: В трех томах. Т. 3. Динамика и устойчивость корпусных конструкций/ Бойцов Г.В., Палий О.М., Постнов В.А., Чувиковский В.С. – Л.: Судостроение, 1982, 320 с.
- 7 Регістр Судноплавства України. Правила класифікації та побудови морських суден. Том 2. Київ: РСУ, 2020. 792 с.
- 8 Суслов В.П., Кочанов Ю.П., Спихтаренко В.Н. Строительная механика корабля и основы теории упругости. Л.: Судостроение, 1972. 720 с.
- 9 Строительная механика корабля и теория упру гости: Учеб. для вузов: В 2 т. – Л.: Судостроение, 1987. Т.2: Постнов В.А., Ростовцев Д.М., Суслов В.П., Кочанов Ю.П. Изгиб и устойчивость стержнем, стержневых систем, пластин и оболочек. – 416 с.: ил.